



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña:
caso de estudio río Vilcanota**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

César Luis AYBAR CAMACHO

Lima, Perú

2016



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Aybar, C. (2016). *Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: caso de estudio río Vilcanota*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el salón de Grados de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 17 de octubre del 2016, siendo las 19:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Jurado Calificador.

Dr. Cabrera Carranza, Carlos Francisco
Ing. Ayala Gutiérrez, Máximo
Ing. Garnica Gonzáles, Luis

Presidente
Miembro
Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la TESIS titulada: **"MODELAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA EN CUENCAS DE MONTAÑA: CASO DE ESTUDIO RÍO VILCANOTA"**, presentada por el Bachiller CÉSAR LUIS AYBAR CAMACHO, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon al Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a: SATISFACCIÓN

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: APROBADO, SOBRESALIENTE (17)

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don CÉSAR LUIS AYBAR CAMACHO.

Siendo las 8:30 PM se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 17 de octubre del 2016

Dr. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA

PRESIDENTE

Ing. MAXIMO AYALA GUTIÉRREZ
MIEMBRO

Ing. LUIS GARNICA GONZÁLES
MIEMBRO

Dedicatoria

A mi madre que me apoyo en todo momento.

Agradecimientos

Antes de exponer esta tesis deseo expresar mi gratitud a todas aquellas personas que con su apoyo y colaboración inestimable han permitido su consecución, sin embargo es necesario hacer una mención especial:

Al Ing. José Luis Quispe, por todos sus comentarios y correcciones y por su instrucción en el uso de SIG cuando aún me encontraba en aulas.

Al PhD. Waldo Lavado, Director de Hidrología Aplicada en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), por todas sus importantes apreciaciones realizadas y por su apoyo científico, técnico y moral constante que han resultado de inestimable valor durante estos últimos años.

A mis compañeros de trabajo de la dirección de hidrología aplicada, por todas las facilidades prestadas, su cordial trato y en especial por haberme mostrado en todas las cosas en las que debo mejorar.

Al PhD. Bram Leo Willems, por haber creído y depositado su confianza en mí en un momento crucial de mi vida.

A MariaElena, Rossi y todos mis queridos compañeros del proyecto Agua Andes, que encaminaron mi vida a la investigación en recursos hídricos, y en donde aprendí que la ciencia aporta una contribución indispensable a la solución de problemas.

A todos mis compañeros de la universidad, pero en particular a Hans, Marysol, Stephany y Evelin con los que pase gratos momentos y porque no han dejado de apoyarme y alentarme desde que nos conocemos.

Y por último a mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de los años.

Resumen

En la primera década del siglo XXI, la cuenca del Vilcanota ha estado sometida a una mayor frecuencia de inundaciones, especialmente en la cuenca baja. Las inundaciones año tras año han propiciado restricciones al crecimiento y desarrollo económico de la región, además de la pérdida de cientos de vidas de incalculable valor económico, con el fin de mitigar este peligro, es crucial entender la formación de la escorrentía superficial identificada como el principal factor en la formación de inundaciones.

Luego del modelamiento de la escorrentía, los resultados nos muestran que la escorrentía es generada principalmente por procesos de exceso de saturación de los suelos en la cuenca, además, al analizar los cambios de cobertura para los periodos 1988, 2001 y 2014 se ha evidenciado cambios que han propiciado un aumento en promedio en la escorrentía de $20.70 \text{ m}^3/\text{s}$ y considerando solo los días en los que ocurrieron caudales críticos un aumento de $76.94 \text{ m}^3/\text{s}$, se espera que de mantenerse las tendencias observadas para el año 2030 estas cifras cambien a 22.70 y $79.22 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Si bien estos valores han predispuesto una mayor susceptibilidad a generar inundaciones, los cambios de cobertura encontrados no explican por si solo la mayor recurrencia observada. Se demuestra que valores altos de intensidad de precipitación no están correlacionados con la formación de caudales críticos y que la condición de humedad antecedente es el factor más importante a la hora de modelar y entender la formación de escorrentía en la cuenca del Vilcanota siendo la cuenca baja el área más sensible a detectar posibles inundaciones, se espera que de seguir las tendencias observadas en las intensidades de precipitación la ocurrencia de inundaciones siga aumentando en la cuenca.

Palabras claves: Escorrentía, modelamiento, cobertura del suelo, condición de humedad antecedente e intensidad de precipitación.

Índice general

Dedicatoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	3
Índice de figuras	7
Índice de cuadros	10
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Planteamiento del Problema	12
1.3. Problemática	13
1.3.1. Problema General	13
1.3.2. Problemas Específicos	13
1.4. Hipótesis	14
1.4.1. Hipótesis general	14
1.5. Hipótesis Específica	14
1.6. Objetivos	14
1.6.1. Objetivo General	14
1.6.2. Objetivos Específicos	14
2. Marco teórico y conceptual	15
2.1. Ciclo hidrológico	15
2.1.1. Precipitación	15
2.1.2. Evapotranspiración	16
2.1.3. Infiltración y percolación	16
2.1.4. Escorrentía	17
2.1.5. Flujo lateral	17
2.2. Modelos hidrológicos	17

2.2.1.	Clasificación de los modelos hidrológicos	18
2.2.2.	Etapas de implementación de un modelo hidrológico	20
2.2.3.	La informática y los SIG en los modelos hidrológicos	22
2.3.	Módulo Hidrológico SWAT	23
2.4.	Optimización por Enjambre de Partículas	24
2.5.	Modelos Predictivos del Cambio de Cobertura de Suelo	29
2.5.1.	Modelos de regresión	29
2.5.2.	Modelos de Transición	31
3.	Caracterización de la zona de estudio	33
3.1.	Descripción general de la cuenca del río Vilcanota	33
3.1.1.	Ubicación geográfica	34
3.1.2.	Aspectos físicos	34
3.1.3.	Aspectos Biológico	41
3.1.4.	Aspectos socioeconómicos	43
3.1.5.	Aspectos Económicos	45
4.	Metodología	46
4.1.	Construcción de la base de datos	46
4.1.1.	Datos necesarios para el modelado hidrológico	46
4.1.2.	Cartografía Temática del área de estudio	47
4.1.3.	Modelo Digital de Elevación (MDE)	47
4.1.4.	Datos hidrometeorológicos e hidrométricos	48
4.1.5.	Datos de cobertura del suelo	49
4.1.6.	Datos de Tipo de Suelo	52
4.2.	Caracterización de la cobertura del suelo en la cuenca del Vilcanota	55
4.2.1.	Procesamiento de Imágenes de Satélite	56
4.2.2.	Predicción de escenarios de cobertura del suelo	59
4.3.	Implementación del modelo SWAT en la cuenca del Vilcanota	64
4.3.1.	Simulación del modelo SWAT	65
4.3.2.	Calibración del Modelo Hidrológico SWAT	67
4.4.	Asimilación y Aplicación al Análisis de Inundaciones	72
4.4.1.	Escenarios de cobertura del suelo como condicionante a Inundaciones	74
4.4.2.	La precipitación efectiva como condicionante a inundaciones	76
4.4.3.	Condición de Humedad Antecedente (CHA) como condicionante a inundaciones	77

5. Discusión de Resultados	81
5.1. Construcción de la base de datos utilizada	81
5.2. Caracterización de la cobertura del suelo	82
5.3. Implementación del Modelo Hidrológico SWAT	84
5.4. Asimilación y aplicación al análisis de inundaciones	85
6. Conclusiones	87
7. Recomendaciones	89
Apéndice	91
Bibliografía	104

Índice de figuras

1.1. Ocurrencia de inundaciones y afectados en la cuenca del Urubamba entre los años 1970 y 2012.	13
2.1. Ciclo Hidrológico. Modificado de Chow et al., 1988.	16
2.2. Tipos de Formación de Escorrentía Superficial. Obtenido de www.meted.ucar.edu	17
2.3. Clasificación de modelos hidrológicos.	18
2.4. Modelos hidrológicos según la naturaleza de sus unidades básica de análisis. A la izquierda tenemos a los modelos agregados, al centro a los semidistribuidos y a la derecha a los distribuidos. Obtenido de http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/Runoff_es/media/graphics/model_approaches.gif	20
2.5. Representación esquemática de los puntos en donde las aplicaciones hidrológicas han tenido mayor repercusión. Obtenido de Olaya, 2004.	23
2.6. Topologías de vecindarios posibles en PSO, con partículas representadas en un espacio bi-dimensional. Obtenido de http://bioinf.modares.ac.ir/?page_id=577	27
2.7. Modificación de la posición de la partícula i . Fuente: Tomado de El-Sawy et al., 2013.	28
2.8. Estructura de un RNA de 3 capas. Obtenido de Basheer and Hajmeer, 2000)	31
3.1. Ubicación de la cuenca del Vilcanota	34
3.2. Climatología de las mencionadas variables hidroclimáticas. Generado a partir de ftp://ftp.senamhi.gob.pe/	36
3.3. Subcuenas hidrográfica del Vilcanota	38
3.4. Unidades fisiográficas presentes en la Cuenca del Vilcanota	39
3.5. Formaciones geológicas presentes en la Cuenca del Vilcanota	41

3.6. Zonas de vida para la cuenca del Vilcanota. Información obtenida del INRENA.	42
3.7. Provincias que se encuentran dentro del ambito de estudio	44
4.1. Portal de descargas del MDE SRTM 4.1	48
4.2. MDE para la cuenca del Río Vilcanota	49
4.3. Registro pluviométrico de la estación Zurite, en la figura superior observamos el registro diario, la figura inferior izquierda representa los datos mensualizados y la figura inferior derecha el diagrama de cajas de los datos diarios.	50
4.4. Estaciones consideradas para el estudio	50
4.5. Ubicación de las imágenes descargadas	51
4.6. Pasos para la obtención del producto GlobalLand30	52
4.7. Portal de descargas del SoilGrids1km	53
4.8. Información de tipo de suelo en la cuenca del río Vilcanota	53
4.9. Metodología seguida para la generación de los escenarios de uso de suelo.	56
4.10. Segmentación de la imagen Landsat en la ciudad de Cusco	58
4.11. Mapa de uso de suelo generado para los años de 1988, 2001 y 2014 en la Cuenca del Rio Vilcanota.	58
4.12. Variables Explicativas consideradas en el estudio	62
4.13. Metodología para la predicción de escenarios de uso de suelo	63
4.14. Escenario generado para el año 2030; en verde se a	64
4.15. Subcuencas generadas en la zona de estudio	66
4.16. Número de HRUs generadas en la cuenca del río Vilcanota	67
4.17. Simulación del modelo SWAT respecto a la Estación hidrométrica km. 105	68
4.18. Diagrama de flujo de la aplicación e interacción entre hydroPSO y el código de modelo para ser calibrado. Fuente: Zambrano-Bigiarini and Rojas 2012	70
4.19. Evolución del óptimo global y el radio de enjambre normalizado frente al número de iteración	71
4.20. Gráfico de dispersión luego de la calibración contra descargas diarias observadas en la estación km.105	72

4.21. Datos de la simulación luego de la calibración frente a las descargas observadas en la estación km.105. El panel superior muestra las series temporales diarias mientras que el panel inferior considera un agrupamiento de los datos por meses. El cuadro resumen de la derecha muestra los resultados de varios indicadores de eficiencia	73
4.22. Serie de Tiempo de caudales en la estación km.105. A la derecha se observa toda la serie de tiempo, la línea en rojo representa el percentil 97.5, a la izquierda observamos solo los caudales que pasaron el percentil 97.5.	75
4.23. Promedio de escorrentía por sub cuencas para distintas cobertura de suelo. El histograma inferior muestra el promedio de escorrentía considerando toda la serie de tiempo; el histograma superior muestra el promedio considerando solo los percentiles 97.5	75
4.24. Promedio de escorrentía por sub cuencas para distintas cobertura de suelo. El histograma superior muestra el promedio de escorrentía considerando toda la serie de tiempo; el histograma inferior muestra el promedio considerando solo los percentiles 97.5	76
4.25. Correlación entre la precipitación máxima efectiva y promedio vs los caudales por encima del percentil 97.5.	76
4.26. Tiempo de concentración de la cuenca (imagen izquierda) a la derecha observamos el tiempo de concentración clasificado cada 24 h., lo gris nos indica un tiempo de concentración menor a 24 h y el área en verde un tiempo mayor a 24h pero menor a 48h.	78
4.27. Correlación entre los índices y el caudal por encima del percentil 97.5 en la estación km.105. La distribución de los datos se muestra en la diagonal, en la parte inferior a la diagonal se muestra los gráficos de dispersión de dos variables con una línea de ajuste y en la parte superior el valor de la correlación.	79
4.28. Cluster generados para el análisis de la CHA.	80
5.1. Información in situ tomada para la realización de soilgrid1km	82
5.2. Intensidad de precipitación diaria para todas las estaciones, la línea plomas representan la serie de cada estación y la línea roja el promedio	86

Índice de cuadros

4.1. Imágenes Landsat adquiridas	51
4.2. Adecuación de la base de datos GlobalLandCover30 a la base de datos del SWAT	52
4.3. Resumen del cambio de cambios observados 1998-2001	59
4.4. Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 1998 y 2001	60
4.5. Resumen del cambio de cambios observados 2001-2014	60
4.6. Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 2001 y 2014	60
4.7. Resumen del cambio de cambios observados 2014-2030	64
4.8. Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 2014 y 2030	65
4.9. Parámetros del modelo SWAT-2005 pertinentes para la simulación hidrológica.	68
4.10. Sensibilidad calculada por el método LH-OAT	70
4.11. Cuadro resumen de los índices de CMA utilizados en esta investigación	77
4.12. Coeficiente de correlación entre los índices de CHA y los caudales por encima del percentil 97.5	80
5.1. Coeficiente V de Cramer para las principales variables explicativas . .	83

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En la actualidad muchos modelos hidrológicos se han utilizado para analizar y predecir la esorrentía en el Perú, sin embargo, pocos de ellos se han convertido en una herramientas de planificación y toma de decisiones, esto se debe principalmente a la gran cantidad de datos de entrada que requieren y los procesos de modelización son demasiado complejos para su aplicación operativa. Por otra parte los avances en la simulación de la esorrentía tanto a nivel local, regional y global se han visto limitados por la dificultad de medir la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones.

Existen muchos estudios que analizan el rol de la esorrentía en la respuesta hidrológica de cuencas. [Wang, 2015](#), estudia como los cambios espaciales y temporales de la cobertura y uso de suelo y la evapotranspiración afectan la producción de esorrentía superficial mensual mediante el modelo hidrológico SWAT en el río Virginia (EEUU); [Chen et al., 2014](#) estudio las producciones de esorrentía con la intención de examinar los impactos hidrológicos de la variabilidad del clima y del cambio de uso de suelo en la cuenca del Río del Este en China; Asimismo [Yen et al., 2015](#) estudia la importancia del estado hidrico previo en la producción de esorrentía. Sin embargo, los estudios antes mencionados tienen la característica de poseer mucha información in-situ, algo totalmente ajeno a nuestra zona de estudio, no obstante, existen propuestas basadas enteramente en sensoramiento remoto como [Inca, 2009](#) que evalúa las implicaciones del cambio de uso de suelo en el funcionamiento ecosistémico y en la formación de sedimentos en la subcuenca de Huatanay, [Iseri, 2013](#) analiza la dependencia entre las cargas contaminantes y la esorrentía superficial en la cuenca del río Chikugo en Japón o [Liu, 2015](#) que analiza la viabilidad de los datos TRMM 3B42 V7 para ser utilizados en un modelo

hidrológico físico; estos estudio fueron realizados en cuencas de gran tamaño, y los resultados muestran un gran sesgo entre lo simulado y observado, aunque los resultados son satisfactorios luego de la calibración es claro el forzamiento y el sobreajuste en los datos finales, estudios de esta índole no presentan confiabilidad, sin embargo, sirven con punto de partida para cuencas en donde la ausencia de información es notoria. Río La cuenca del río Vilcanota es una cuenca de montaña perteneciente al sistema hidrográfico del Amazonas, afectada recurrentemente por distintos tipos de peligros, siendo los de mayor gravedad los relacionados a las inundaciones y riadas, a pesar de ello, no existen estudios científicos que ayuden a entender y pronosticar estos peligros o alguna de sus componentes hidrológicas, esto puede ser explicado por el alto costo de los estudios y falta de capital humano. No obstante, podemos mencionar estudios puntuales que se realizaron tratando de entender el origen y la recurrencia de la inundación del 2010, considerada la mayor inundación del cual se tiene registro, así podemos mencionar a [Lavado et al., 2010](#), que relaciona dicho evento con índices extremos de precipitación para determinar así su variabilidad climática y [Roberts Matthew and Emma, 2012](#), que estima el tiempo de retorno y el nivel de la lámina de agua en la inundación del 2010 mediante modelos estadísticos.

1.2. Planteamiento del Problema

Existe una sensación en el pensar colectivo de la población ubicada en los distritos alrededores del ámbito de estudio, de que las inundaciones y riadas han aumentado tanto de frecuencia e intensidad, esto también se ha visto reflejado en la base de datos de DesInventar e INDECI (ver figura 1.1), ¿esto puede ser atribuido a una variabilidad natural de los factores activadores de inundaciones o solo es producto a una mayor exposición de las poblaciones al peligro? .En la cuenca del río Vilcanota, las inundaciones son formadas principalmente a causa de la escorrentía superficial inmediata, por lo que esta correlacionada con lluvias intensas y aumentos de caudal. Se entiende por escorrentía al resultado de la interacción de la orografía, el tipo de suelo de la cuenca y del propio río, la vegetación, la intensidad de precipitación y la condición de humedad, siendo las 3 últimas, identificadas como los únicos componentes que a lo largo de los años han presentado cambios significativos. Es por ello, que se plantea la necesidad de un estudio abocado a entender la formación de la escorrentía superficial en la cuenca del río Vilcanota y de los factores que la conforman. Su cuantificación y monitoreo es vital a la hora de plantear cualquier

proyecto hidráulico o de infraestructura, planes de gestión de recursos hídricos o planes de gestión de riesgo.

Sin embargo, los instrumentos y métodos para su medición directa son costosos y poco prácticos, por ello los modelos hidrológicos son muy importante debido a la posibilidad de su estimación indirecta basado en datos de precipitación, temperatura y condiciones físicas del medio.

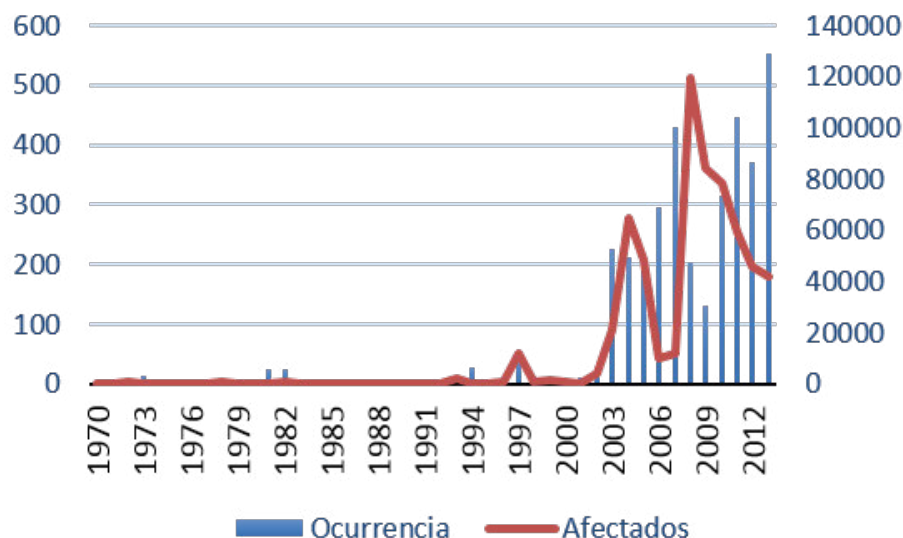


Figura 1.1: Ocurrencia de inundaciones y afectados en la cuenca del Urubamba entre los años 1970 y 2012.

1.3. Problemática

1.3.1. Problema General

- ¿Es posible cuantificar y analizar espacio temporal la cuenca del río Vilcanota?.

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuán viable será el uso de sensoramiento remoto como medio para obtener información física del medio?
- ¿Es posible cuantificar el uso del suelo en la Cuenca del río Vilcanota?
- ¿La información previamente obtenida será suficiente?
- ¿Cómo y con qué variables se pueden plantear indicadores para predecir la ocurrencia e intensidad de inundaciones?

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- La escorrentia podrá ser caracterizada espacio temporal pero solo a una resolución regional, la construcción espacial de esta variable se verá imposibilitada por la pobre cantidad de estaciones.

1.4.2. Hipótesis Específica

- La base de datos basada en sensoramiento remoto permitirá obtener información confiable solo para fines de estudios exploratorios.
- La cobertura podrá ser obtenida eficientemente si se plantea el uso de imágenes Landsat, MODIS no es eficiente para los objetivos de la investigación.
- Indicadores de base estadística basados en la precipitación con ventanas móviles estimarán adecuadamente las inundaciones.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

- Cuantificar y analizar espacial y temporalmente la escorrentia en la cuenca del río Vilcanota, a fin de entender la ocurrencia de inundaciones.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Analizar la viabilidad de una base de datos basada en sensoramiento remoto para el modelamiento hidrológico y mapas de cobertura del suelo.
- Cuantificar el cambio de cobertura del suelo en la Cuenca del río Vilcanota.
- Modelar la cuenca del Vilcanota mediante el modelo hidrológico SWAT.
- Plantear indicadores que permitan predecir la ocurrencia e intensidad de inundaciones.

Capítulo 2

Marco teórico y conceptual

2.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua (Chow et al., 1988), es descrito como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). El ciclo hidrológico es completamente irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el ser humano. Una muestra de ello son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua para las diferentes actividades, otros periodos de sequías y otros de inundaciones (Villón, 2004). El ciclo hidrológico está conformado principalmente por los siguientes componentes: (ver figura 2.1).

2.1.1. Precipitación

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón, 2004).

No toda el agua precipitada llega a la superficie de forma directa, hay una parte de ella que es interceptada en su trayecto; esta intercepción la realizan las plantas, por lo que se puede diferenciar dos términos, la precipitación incidente y la precipitación neta (Reyes, 2014).

La precipitación incidente es la cantidad total de lluvia que es medida por encima de la copa de los árboles o en un terreno abierto adyacente al bosque mientras que la precipitación neta está compuesta por las gotas de agua que caen o drenan al suelo desde el follaje y las ramas o que se escurren a través de los troncos.

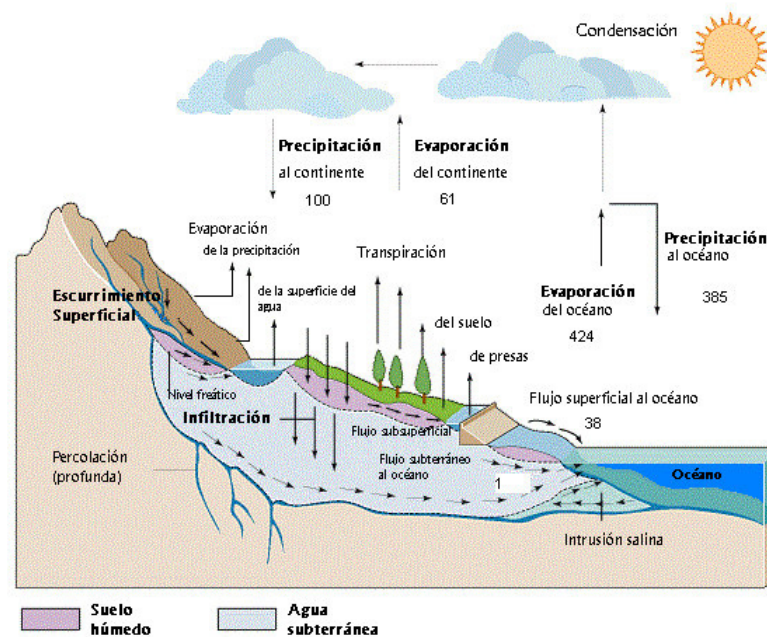


Figura 2.1: Ciclo Hidrológico. Modificado de Chow et al., 1988.

La diferencia entre la precipitación neta con la incidente es conocida como interceptación de la precipitación (Tobón and Morales, 2009).

2.1.2. Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es un fenómeno combinado de pérdida de agua por transpiración y evaporación directa del agua del suelo. Corresponde al fenómeno físico del pasaje de agua del estado líquido al gaseoso en condiciones naturales, dependiendo de la disponibilidad de agua para la vegetación y necesitando una importante cantidad de energía para que el proceso ocurra (Del Carmen, 2001).

2.1.3. Infiltración y percolación

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares and Mijares, 1989). La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda.

2.1.4. Escorrentía

Se entiende por escorrentía a la lámina de agua que circula libremente sobre la superficie terrestre. Se puede producir dos tipos de escorrentía www.meted.ucar.edu :

Escorrentía por exceso de infiltración: Se produce en los suelos que no están saturados. De hecho, el suelo puede estar muy seco, pero debido a las propiedades del suelo o de la cubierta del suelo el proceso de infiltración no puede absorber el agua producida por un aguacero o un deshielo rápido.

Escorrentía por exceso de saturación: Se produce cuando el suelo está saturado y no queda espacio para que se infiltre más agua. Esto puede ocurrir incluso en suelos que normalmente, en condiciones subsaturadas, permiten la infiltración de grandes cantidades de agua. (ver figura 2.2)

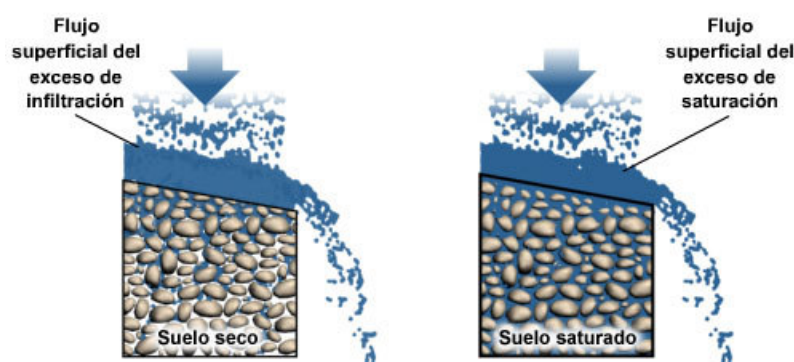


Figura 2.2: Tipos de Formación de Escorrentía Superficial. Obtenido de www.meted.ucar.edu.

2.1.5. Flujo lateral

El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, ríos, lagos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control (Proano et al., 2006).

2.2. Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico puede definirse como la representación matemática del ciclo del agua sobre una determinada porción de territorio, con la finalidad de realizar

transformaciones lluvia-escurrentía. Los modelos hidrológicos buscan simplificar la complejidad del mundo real por medio de una selección de los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico modelado, de forma que generalmente cuantas más simplificaciones supone un modelo, menos precisos serán sus resultados. Un sistema hidrológico engloba el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre unas variables de entrada convirtiéndolas en otras variables de salida (Clarke, 1973).

2.2.1. Clasificación de los modelos hidrológicos

En general los modelos hidrológicos se dividen en 4 (Ponce, 1989): (1) determinísticos, (2) probabilísticos, (3) conceptuales, y (4) paramétricos. Ver figura 2.2.

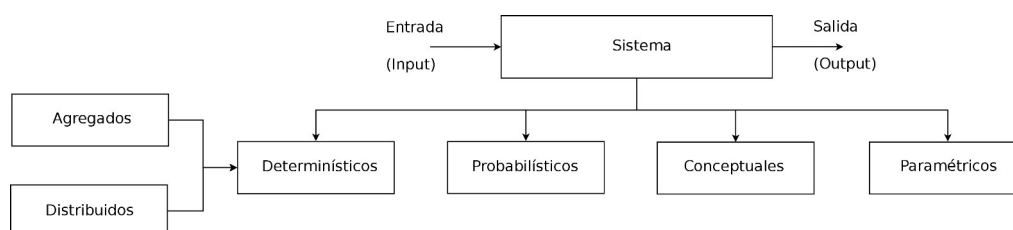


Figura 2.3: Clasificación de modelos hidrológicos.

- **Los modelos determinísticos** son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables, parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Implica una relación causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos; y deberían proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos.
- **Los modelos probabilísticos** son exactamente lo opuesto en significado a los modelos determinísticos. Un modelo probabilístico se formula siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: estadísticos, y estocásticos.
- **Los modelos estadísticos** tratan con datos observados, mientras que los modelos estocásticos, lo hacen con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales.
- **Los modelos conceptuales** son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya

sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos.

- **Los modelos paramétricos** son los más simples de todas las propuestas de modelado. Como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está restringida al rango de datos utilizados en la determinación de los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros.

2.2.1.1. Modelos distribuidos frente a los modelos agregados

Los modelos hidrológicos determinísticos pueden subclasificarse en modelos agregados y modelos distribuidos (Carpenter, 2006), cuya diferencia recae sobre la unidad básica de análisis en la que divide la zona de estudio.

Los modelos agregados consideran las cuencas y subcuencas como unidades de trabajo. En cambio, en los modelos distribuidos las unidades tienen generalmente menor tamaño y están definidas de forma más regular. Además estas unidades no tienen un significado hidrológico tan definido ni representan elementos hidrográficos concretos (Olaya, 2004).

Los conceptos de modelos concentrados y distribuidos, opuestos en significado, no son necesariamente excluyentes ya que los modelos concentrados pueden ser usados como componentes de un gran modelo distribuido (Ponce, 1989, p. 393).

Lo que realmente constituye una diferencia importante entre los métodos agregados y distribuidos, dentro del estudio hidrológico y desde el punto de vista espacial, es la forma de realizar la subdivisión de la cuenca.

Los métodos distribuidos dividen el terreno en celdas de forma regular, generalmente cuadrangulares, dando lugar a un “grid” o matriz de datos. El objetivo es hacer la unidad de cálculo suficientemente pequeña para poder considerar

constante el valor de las variables y parámetros, que intervienen en los fenómenos que van a ser analizados, dentro de la misma.

También podemos aplicar un modelo agregado en divisiones hidrográficas naturales o subcuencas; y, aunque se sepa que las variables y parámetros no pueden ser constantes en toda la unidad, adoptar los valores medios disponibles como representativos de los valores reales. Este enfoque, mediante divisiones en subcuencas, se presta menos a la mecanización del conjunto del territorio a estudiar, que las celdas regulares; y, da lugar a los denominados modelos semidistribuidos de gran aplicación en cuencas de mayor tamaño. (ver figura 2.4)

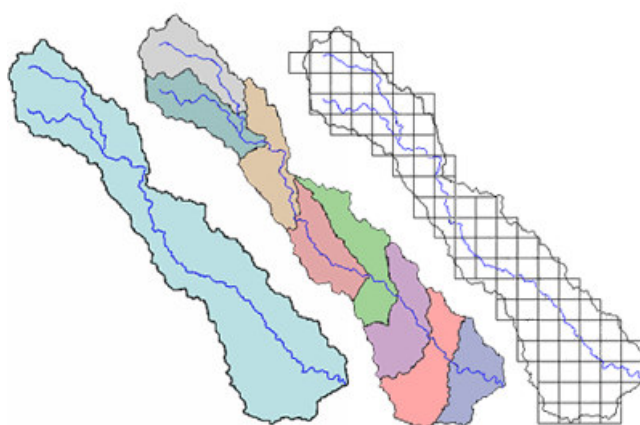


Figura 2.4: Modelos hidrológicos según la naturaleza de sus unidades básica de análisis. A la izquierda tenemos a los modelos agregados, al centro a los semidistribuidos y a la derecha a los distribuidos. Obtenido de http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/Runoff_es/media/graphics/model_approaches.gif

2.2.2. Etapas de implementación de un modelo hidrológico

La implementación de un modelo hidrológico indiferente a los propósitos particulares del mismo, requiere de tres etapas bien definidas:

- Selección o construcción del modelo
- Calibración
- Validación

2.2.2.1. Selección o construcción del modelo

La construcción de un modelo de cuenca comienza con la selección de los componentes del modelo. Una vez que éstos han sido elegidos, se unen como partes del todo, siguiendo una secuencia lógica que recuerda a la del proceso

natural. La lluvia y la nieve son consideradas primero, seguidas por las abstracciones hidrológicas, la generación del hidrograma de la subcuenca, reservorio y tránsito de la corriente en el canal, y su combinación en las confluencias de la red hidrográfica (Ponce, 1989).

La selección del modelo adecuado implica en primer lugar, definir la escala física y la escala de tiempo en que se desea trabajar; y a partir de ello, se puede decidir la estrategia de la modelización, seleccionando el ámbito de la modelización (la cuenca, el tramo de río, etc.) y el horizonte temporal (modelo continuo o de evento, periodicidad de los resultados, duración de la simulación, etc.). En este paso es fundamental la definición de los datos que estarán disponibles para la construcción, calibración y explotación del modelo, puesto que la concepción global del modelamiento, ha de ser consistente con la calidad de los datos disponibles (Oñate Valdivieso, 2009).

2.2.2.2. Análisis de sensibilidad

Debido las condiciones subjetivas en las que fueron ideadas muchas de las ecuaciones empíricas utilizadas en modelamiento hidrológico, es necesario un paso complementario que posibilite estimar niveles de certeza y establecer una medida cuantitativa del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del mismo.

La sensibilidad es analizada usualmente aislando el efecto de cierto parámetro. Si un modelo es altamente sensible a un parámetro dado, pequeños cambios en el valor de ese parámetro podría producir cambios significativos en el rendimiento del modelo. Por ello, es necesario concentrar el esfuerzo del modelado en obtener buenas estimaciones de este parámetro. Por otro lado, los parámetros poco sensibles pueden ser relegados a un rol secundario (Ponce, 1989).

2.2.2.3. Calibración del modelo

Los modelos hidrológicos tienen por finalidad simular los fenómenos físicos en torno al agua. Sin embargo, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a la presencia de errores de diferente origen, por lo que es imprescindible un proceso de calibración para conseguir que éste simule adecuadamente el comportamiento del sistema que representa (Ponce, 1989).

Según Tucci, 1998, la optimización es la búsqueda del valor de una variable o de n variables, que proporcionen el mejor resultado para una función objetivo obedeciendo ciertas restricciones. Las técnicas iterativas de optimización son utilizadas para

ajustar los parámetros de los modelos hidrológicos porque normalmente la función objetivo resultante del uso de estos modelos es implícita, es decir los parámetros a ser optimizados no forman parte explícitamente de la función objetivo. Existen en la literatura numerosos métodos de optimización, en este caso se utilizó el método de optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization o PSO, por sus siglas en inglés).

2.2.2.4. Validación

Refsgaard and Knudsen, 1996 define la validación como la etapa de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración.

Normalmente el desempeño del modelo en la etapa de validación se cuantifica mediante el cálculo del coeficiente de correlación R^2 , la eficiencia EF (Nash and Sutcliffe, 1970) y el error cuadrático medio (RMSE) entre caudales observados y calculados por el modelo.

2.2.3. La informática y los SIG en los modelos hidrológicos

Las aplicaciones informáticas a lo largo de los años se han consolidado como verdaderas herramientas con valor propio dentro de la modelización hidrológica, sirve de primera imagen acerca de la relación que entre la ciencia de la hidrología y la de la computación ha existido a través de los últimos (Olaya, 2004).

El esquema de la figura 2.5 representa a modo de síntesis el panorama en donde la informática ha tenido alguna relevancia en la hidrología, se encuentran señaladas en trazo grueso aquellas áreas donde ha sido más notable respecto a las aproximaciones y modelos clásicos.

Los sistemas de información geográfica, también conocidos con el acrónimo SIG, viene representando en la actualidad la apertura de un nuevo campo de estudio e investigación, que extiende las posibilidades del análisis hidrológico hasta límites con anterioridad insospechado. Olaya, 2012 menciona que los SIG han permitido la realización las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).

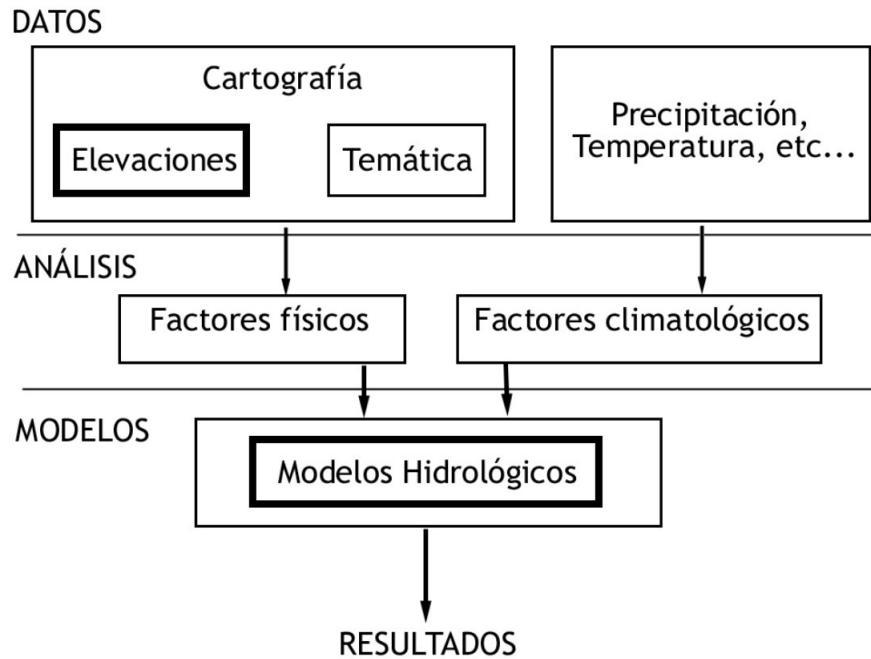


Figura 2.5: Representación esquemática de los puntos en donde las aplicaciones hidrológicas han tenido mayor repercusión. Obtenido de Olaya, 2004.

- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

2.3. Modelo Hidrológico SWAT

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), de obtención gratuita y disponible en internet: (<http://swat.tamu.edu/software/swat-executables/>) tanto para sistemas operativos windows y GNU/Linux, es un modelo continuo de base física usado para pronosticar el impacto que las prácticas de manejo del suelo tienen en el agua, sedimentos y nutrientes en largos períodos de tiempo (Di Luzio et al., 2002).

SWAT está definido por 8 componentes: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de plantas, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo (Miller et al., 2007). El presente estudio se enfoca en los componentes de hidrología y clima. El ciclo hidrológico que simula SWAT se basa en la ecuación de contenido final de agua en el suelo.

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i + Q_i - ET_i + P_i - QR_i) \quad (2.1)$$

Donde:

- SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t .
- SW es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo menos el contenido de agua a 15-bar.
- t es el tiempo en días.
- R es la precipitación diaria.
- Q la cantidad de escorrentía diaria.
- ET la evapotranspiración diaria.
- P la percolación diaria.
- QR el flujo de retorno o flujo base.

La simulación de la escorrentía a paso diario se obtiene mediante el uso de la técnica de número de curva (CN) y paso horario por la ecuación de infiltración de Green-Ampt. El modelo ofrece tres opciones para estimar el potencial de Evapotranspiración (ET): Hargreaves ([Hargreaves and Samani, 1985](#)), Priestley-Taylor ([Priestley and Taylor, 1972](#)) y Penman-Monteith ([Monteith, 1965](#)). El componente hidrológico de la escorrentía superficial utiliza la fórmula de Manning para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, que es considerado tanto para tierra como para el canal de flujo.

SWAT ha sido utilizado por investigadores de todo el mundo para diversas aplicaciones en pequeñas y grandes cuencas e incluso a escala continental ([Abbaspour et al., 2015](#); [Peraza-Castro et al., 2015](#); [Yacoub and Pérez-Foguet, 2009](#); [Musau et al., 2015](#); [Quintero et al., 2009](#)). Las ventajas del modelo SWAT son: posibilidad de modelar en cuencas no aforadas, predicción sobre el impacto relativo de los datos de entrada alternativos (por ejemplo, cambios en las prácticas de gestión, el clima, la vegetación, etc).

2.4. Optimización por Enjambre de Partículas

Dentro de las heurísticas de la inteligencia colectiva se encuentra el algoritmo de optimización mediante enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization o PSO, por sus siglas en inglés) propuesto por [Eberhart and Kennedy, 1995](#). Se reconocen dos influencias básicas de inspiración en PSO:

- El movimiento de bandadas de aves, en las que cada individuo se desplaza mediante reglas simples de ajuste de su velocidad en función de las observaciones que realiza sobre los individuos próximos en la bandada.
- Un modelo social, en el que cada partícula representa una creencia, y las influencias entre individuos, la aproximación de unos individuos a otros por difusión de dichas creencias.

Se ha demostrado que PSO es una técnica muy eficiente para resolver problemas de optimización de tipo continuo. Prácticamente cualquier modelo conexionista puede ser entrenado por un algoritmo basado en PSO. Una ventaja que esta técnica tiene con respecto a otras se debe a su nula necesidad de requerir el gradiente de la función de activación (Franco, 2011).

Una solución potencial es representada en PSO mediante un vector llamado partícula, individuo, elemento, agente o simplemente solución. Cada una de estas partículas i tiene la misma dimensión n y se representan de la siguiente manera:

$$X(i) = (x_{(i,1)}, x_{(i,2)}, \dots, x_{(i,n)}) \quad (2.2)$$

Las partículas, sobre el espacio de búsqueda n -dimensional, “vuelan” tratando de encontrar una solución óptima. Para hacer esto, cada individuo ajusta su posición de acuerdo a una combinación lineal de su inercia, su propia experiencia y del conocimiento del enjambre.

Cada agente almacena en una memoria la mejor posición encontrada hasta el instante actual t . La experiencia de la partícula se denota como:

$$P(i) = (p_{(i,1)}, p_{(i,2)}, \dots, p_{(i,n)}) \quad (2.3)$$

El conocimiento del enjambre es el conjunto de memorias de cada partícula. A diferencia de los algoritmos genéticos, en PSO no existe la competencia entre individuos. Por lo tanto, la interacción entre las partículas, para obtener un beneficio, es la norma. Para hacer esto, cada partícula pone a disposición de los demás su memoria de conocimiento.

El algoritmo se diseñó inicialmente con un vecindario dinámico, dada la analogía con la bandada de aves. Sin embargo, pronto se determinó que, para los problemas de optimización considerados, era suficiente y más eficiente que el vecindario de cada partícula se definiera de forma estática: es decir, cada partícula tiene unos vecinos definidos a priori. En ello se aproxima a los algoritmos genéticos celulares, autómatas celulares, y varios modelos de computación neuronal.

PSO modela la cooperación entre individuos mediante la definición de un vecindario para cada partícula, de modo que en cada iteración se selecciona un candidato de dicho vecindario para guiar la búsqueda de la partícula (termino social ($c_2 r_2^t (G_i - X_i^t)$) de la ecuación 2.6).

El algoritmo se diseñó inicialmente con un vecindario dinámico, dada la analogía con la bandada de aves. Sin embargo, pronto se determinó que, para los problemas de optimización considerados, era suficiente y más eficiente que el vecindario de cada partícula se definiera de forma estática: es decir, cada partícula tiene unos vecinos definidos a priori. En ello se aproxima a los algoritmos genéticos celulares, autómatas celulares, y varios modelos de computación neuronal.

En líneas generales, las topologías más interconectadas distribuyen la información de la mejor solución del enjambre con mayor rapidez; ello produce una convergencia más rápida. Por otro lado, si esta velocidad es demasiado rápida, se incrementa la probabilidad de que no se explore completamente el espacio de búsqueda; en ese caso se puede producir la convergencia a un óptimo local en lugar de al óptimo global.

La topología Global Best (gbest) consiste en considerar que todas las partículas están interconectadas. Si dicha partícula está próxima, en la inicialización, a un óptimo local, será difícil que el enjambre escape al mismo. Por lo tanto, la topología gbest es la de máxima interconexión, el uso de topología global best sólo resulta adecuado en casos de problemas de optimización unimodales, es decir, cuando no existe riesgo de convergencia prematura, ya que sólo existe un óptimo y es global.

En el extremo opuesto (baja interconexión), se define la topología Local Best (“lbest”), con una cardinalidad que suele ser reducida con respecto al número de partículas del enjambre. En muchos casos el número de vecinos se mantiene en 3 o 5, incluyendo a la partícula en cuestión (que sería vecina de sí misma). Habitualmente se imaginan las partículas unidas en un anillo, y simplemente cada partícula es vecina de las dos adyacentes (una a cada lado del anillo), o de las cuatro adyacentes (dos a cada lado). La representación geométrica puede apreciarse en la figura 2.6 (Parraguez et al., 2015).

Al igual que en otros algoritmo de tipo evolutivo, PSO necesita de una función de evaluación (también llamada función de aptitud u objetivo). Esta permite determinar la calidad de las soluciones. Su importancia radica en que es la única forma de poder evaluar la posición de cada elemento.

$$V(i) = (v_{(i,1)}, v_{(i,2)}, \dots, v_{(i,n)}) \quad (2.4)$$

Para realizar un desplazamiento, la partícula determina la velocidad considerando su propia inercia W (busca evitar la convergencia prematura), su

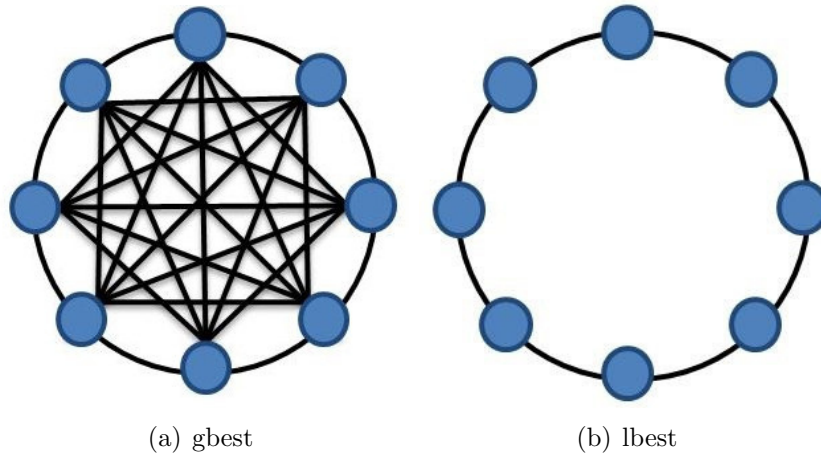


Figura 2.6: Topologías de vecindarios posibles en PSO, con partículas representadas en un espacio bi-dimensional. Obtenido de http://bioinf.modares.ac.ir/?page_id=577

memoria de conocimiento y su confianza en el enjambre, para después, sumarla a la posición actual.

El grado de confianza lo determinan los operadores aleatorios r_1 y r_2 (en el rango 0-1) junto con los coeficientes de confianza c_1 y c_2 . Estos últimos, también llamados constantes de aceleración, son los términos que tiran a cada partícula hacia las posiciones P y G (Eberhart and Shi, 2001).

En otras palabras, las partículas hacen un movimiento hacia un punto intermedio tomando en cuenta la mejor posición previa, el mejor informante y un punto accesible desde la posición actual (ver figura 2.7). El ajuste de la posición de las partículas es conceptualmente similar a la operación de cruce usado por los algoritmos genéticos (Eberhart and Kennedy, 1995).

Las ecuaciones siguientes ajustan la velocidad y posición de cada partícula:

$$V_i^{t+1} = w^t V_i^t + c_1 r_1^t (P_i - X_i^t) + c_2 r_2^t (G_i - X_i^t) \quad (2.5)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (2.6)$$

Dónde: V_i^{t+1} es la velocidad ajustada, W^t la inercia del propio movimiento, c_1 el coeficiente de confianza en la experiencia, c_2 el coeficiente de confianza en la experiencia del grupo, P_i la mejor posición previa de i , X_i^{t+1} la posición actual de i , V_i^{t+1} la posición actual de i , G_i la mejor posición previa encontrada por el grupo, r_1^t y r_2^t son operadores aleatorios entre 0 y 1., X_i^{t+1} es la posición de la partícula i después del ajuste.

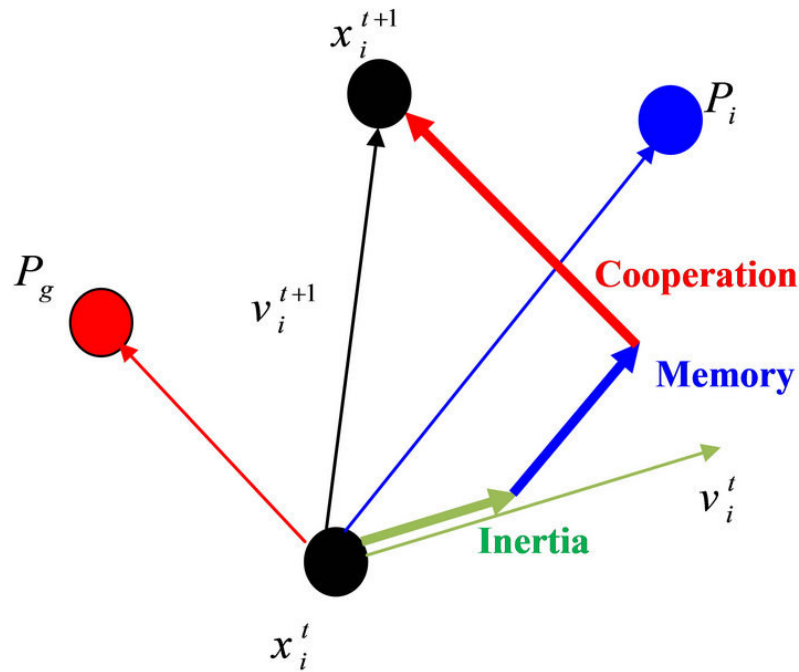


Figura 2.7: Modificación de la posición de la partícula i . Fuente: Tomado de El-Sawy et al., 2013.

En términos generales, PSO se puede describir en tres pasos. El primero es evaluar cada elemento para determinar la calidad de la posición actual. Esto permite que se puedan encontrar la mejor y las mejores partículas. Después, se deben realizar los ajustes necesarios de las mejores posiciones previas. Por último, se determinan los nuevos desplazamientos para cada partícula con la información ajustada. Por analogía, estos movimientos no son más que una forma de tratar de imitar a otros individuos.

Para detener el proceso se necesita que un criterio de parada se cumpla. Este puede ser determinado por un número fijo de ciclos, opcionalmente, combinado con un umbral de error aceptable. Al terminar la ejecución del algoritmo, la solución que reporta el método es la mejor posición previa encontrada por alguna partícula l . Franco, 2011 menciona que los pasos necesarios a considerar para aplicar el método de PSO con éxito son los siguientes:

- Inicializar la población. La posición de cada una de las partículas es determinada de manera aleatoria.
- La mejor posición previa es igualada a la posición actual.
- Cada posición es evaluada en la función de aptitud para determinar la calidad de la solución.
- Se compara la aptitud de la posición actual con la mejor previa.

- e. Asignar informantes (vecindario) de tamaño k a la partícula.
- f. Determinar la mejor partícula del vecindario.
- g. Ajustar la velocidad.
- h. Ajustar la posición.
- i. Verificar si se cumple el criterio de parada.
- j. Si no se cumple, regresar al paso e.

La versión original de PSO presentaba algunas desventajas. Si la mejor solución está estancada en algún óptimo local, todas las partículas tenderán rápidamente a concentrarse en ese punto (Afsahi and Meybodi, 2010). Otra importante desventaja era su poco control para tener un balance entre la exploración y la explotación. Para contrarrestar estos problemas, se utiliza el coeficiente de inercia W (Abdel-Kader, 2010).

2.5. Modelos Predictivos del Cambio de Cobertura de Suelo

El análisis y modelamiento del cambio de cobertura de suelo pretende identificar sus causas, su ubicación y el momento en que ocurrieron (Oñate Valdivieso, 2009). Para que un modelo predictivo se transformen en una herramienta útil es necesario que representen de manera eficaz la magnitud de los cambios, la localización de los futuros cambios, y; los patrones espaciales de estos cambios (Brown et al., 2002).

Para modelar los patrones espaciales de los cambios Theobald and Hobbs, 1998, sintetizan los modelos causales del cambio del uso de cobertura en dos tipos principales: modelos de regresión y modelos basados en la transición espacial. El primer tipo establece relaciones funcionales entre un grupo de variables espaciales predecibles que son utilizadas para predecir la localización de los cambios en el paisaje. Este tipo incluye modelos de regresión logísticos, modelos de precio hedónico y redes neurales artificiales. El segundo tipo de modelo es ejemplificado por una extensión espacio-temporal del modelo de transición de Markov conocido como autómatas celulares. Ambos tipos de modelos pueden utilizarse para incluir sitios geográficos y variables de situación en los cambios modelados (Brown et al., 2000).

2.5.1. Modelos de regresión

Los modelos basados en regresión establecen relaciones entre un amplio rango de variables explicativas/predictivas y los cambios observados de ocupación del suelo,

para posteriormente, utilizar dichas variables para estimar la localización de los cambios futuros sobre el paisaje (Oñate Valdivieso, 2009).

La influencia de estos factores locales sobre el cambio de ocupación del suelo, puede ser modelado en función del decaimiento de la distancia, donde la influencia decrece con el incremento de ésta (Weng, 2002), o empleando variables distribuidas espacialmente como el tipo edafológico del suelo, la pendiente, elevación, etc., en la que su influencia viene dada por su posición geográfica.

Generalmente en la modelación en base a regresión se ha hecho uso de aproximaciones lineales, como las regresiones logísticas y no lineales como las redes neuronales, estas últimas se detallaran con mayor detalle debido que fue utilizado en este trabajo.

2.5.1.1. Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales (Artificial Neural Network o RNA, por sus siglas en inglés) son sistemas de procesamiento que tratan de reproducir la capacidad que tiene el cerebro humano para reconocer patrones, hacer predicciones o tomar una decisión en base a la experiencia pasada. Así, mientras el cerebro humano confía en la estimulación neuronal, las redes neuronales actúan sobre un conjunto de datos para aprender. Dichas redes destacan por su desempeño en la solución de complejos problemas, donde el reconocimiento de modelos o comportamientos es importante (Freeman and Skapura, 1993).

Debido a su precisión, eficiencia, y la capacidad de modelar las relaciones no lineales, red neural artificial (RNA) son ahora ampliamente utilizado para la clasificación, reconocimiento de patrones, la función de aproximación, y la optimización en diversas aplicaciones (Jain et al., 1996).

Un número de investigadores han informado con éxito en la aplicación RNAs para calibrar los modelos de uso/cobertura de suelo en diversas regiones (Oñate Valdivieso, 2009; Mahajan and Venkatachalam, 2009; Isong et al., 2012).

Una RNA consiste principalmente de una capa de entrada, una o más capas ocultas, y una capa de salida. Cada capa consiste en un número de neuronas. Cada neurona en la capa de entrada acepta una de las variables de entrada y genera un valor de salida a la capa siguiente. De tal manera, las variables de entrada son como señales que pasan a través de las capas de la RNA y, finalmente, generan valores de salida (Qiang and Lam, 2015).

En la figura 2.7 se ilustra la arquitectura de una de tres capas RNA. La ecuación 2.8 describe cómo una neurona en la capa de receptor recibe los valores de las neuronas en la capa de remitente, donde I_i^n es el valor de entrada de la neurona

i -ésima en la capa de emisor y I_j^{n+1} es la salida generada por la neurona j -ésimo en la capa de receptor. W_{ij} denota los pesos de los valores de entrada y b es un valor añadido al sesgo de la suma de todas las entradas. Hay algunas opciones para la función de transición f . La selección de f depende de las características de los datos a ser entrenado. En la capa de entrada, todas las variables deben ser reescalado en el rango entre 0 y 1 para la normalización (Qiang and Lam, 2015).

$$I_j^{n+1} = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij} I_i^n + b_j\right) \quad (2.7)$$

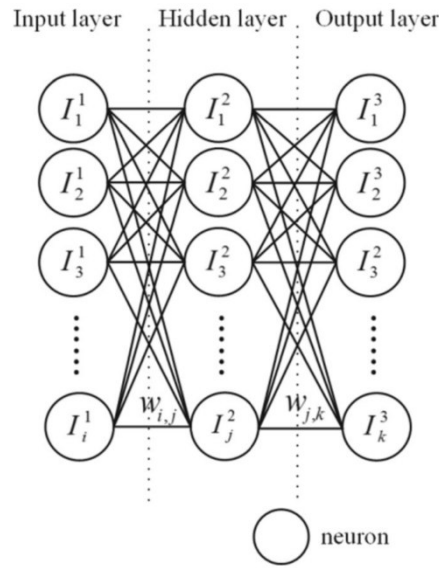


Figura 2.8: Estructura de un RNA de 3 capas. Obtenido de Basheer and Hajmeer, 2000)

2.5.2. Modelos de Transición

Los modelos basados en transición espacial asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Estos modelos abarcan, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Pontius and Malanson, 2005; Van Vliet et al., 2012)

2.5.2.1. Automatas Celulares

Los autómatas celulares (AC) son un tipo de modelo discreto comúnmente utilizado en la modelización de procesos espacio-temporales. Un autómata celular está caracterizado por los siguientes componentes:

- Una rejilla o cuadrículado (lattice) de enteros (conjunto \mathbb{Z}) infinitamente extendida, y con dimensión $d \in \mathbb{Z}^+$. Cada celda de la cuadrícula se conoce como célula.
- Cada célula puede tomar un valor en \mathbb{Z} a partir de un conjunto finito de estados k .
- Cada célula, además, se caracteriza por su vecindad, un conjunto finito de células en las cercanías de la misma.
- De acuerdo con esto, se aplica a todas las células de la cuadrícula una función de transición (f) que toma como argumentos los valores de la célula en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendrá en la siguiente etapa de tiempo. Esta función f se aplica de forma homogénea a todas las células, por cada paso discreto de tiempo.

Cada AC es inherentemente un modelo espacial, es directamente compatible con los datos de mapa de bits y se puede implementar fácilmente en un SIG. Hoy en día, es ampliamente aplicado en el modelado de los procesos ambientales y ecológicos (Wang et al., 2006; Ward et al., 2000).

Capítulo 3

Caracterización de la zona de estudio

En este capítulo se centra en la descripción general de la cuenca del Vilcanota considerando, por un lado la ubicación geográfica, los aspectos físicos más importantes como: el clima, la vegetación, la geología y la fisiografía, la descripción del componente biológico y finalmente, se describen las características socioeconómicas más importantes de los centros urbanos pertenecientes y circundantes a la cuenca, exponiendo información sobre características sociales e información de los corredores económicos existentes, este punto es ineludible ya que nos ayudará a entender de mejor manera las formas de ocupación del territorio a lo largo de los años.

3.1. Descripción general de la cuenca del río Vilcanota

La Cuenca del Vilcanota constituye uno de los ecosistemas de montaña más importantes del sur del país debido al potencial turístico que alberga y más aún por su inserción en el sistema amazónico. Pese a sus potencialidades, se evidencia cada vez más, un deterioro de sus bases productivas debido a gravísimos procesos de contaminación de aguas, erosión de los escasos suelos con aptitud agropecuaria; depredación de la cobertura vegetal; erosión genética, degradación de ecosistemas, inundaciones, etc., esto es consecuencia del modelo de desarrollo imperante que alimenta, la ocupación informal del territorio, la desorganización social, la pobreza, el desempleo entre otros.(Gómez, 2004)

3.1.1. Ubicación geográfica

La cuenca del Vilcanota es la naciente del río Urubamba se encuentra en la región Cusco, al sur del Perú, se localiza políticamente en las provincias de Canas, Canchis, Acomayo, Quispicanchis, Paucartambo, Cusco, Anta, Urubamba, Calca y La Convención, tiene su origen en el nevado de Cunuruna, en la provincia de Canchis, y finaliza en su confluencia con el río Yanatile, en la provincia de La Convención. Tiene una superficie aproximada de $96\,276\text{ km}^2$ (ver Figura 3.1).

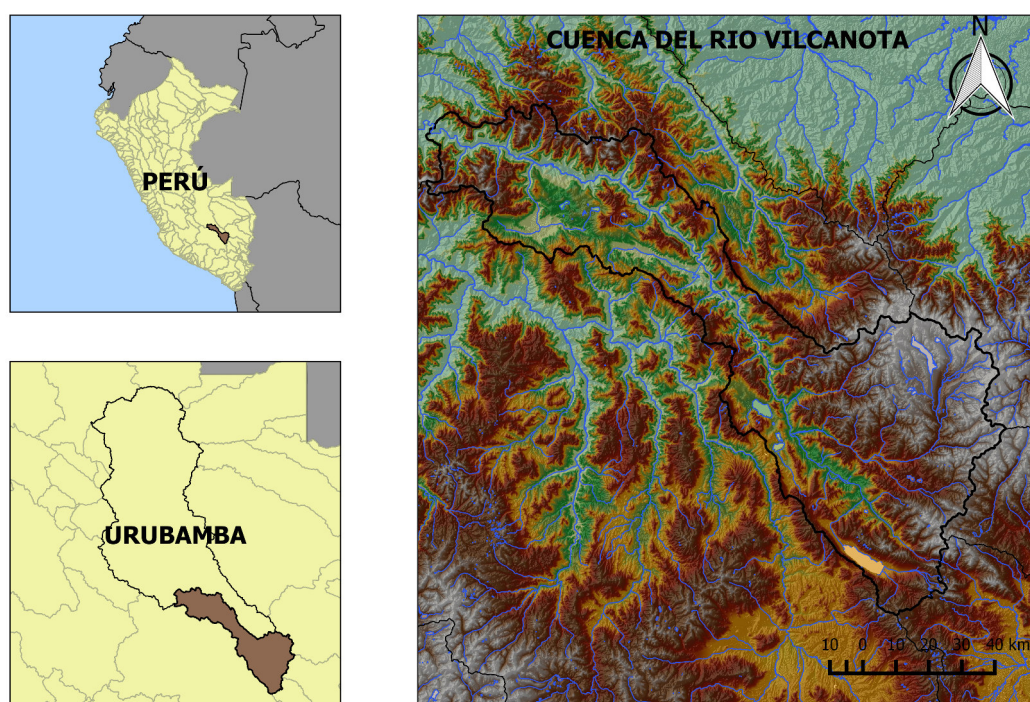


Figura 3.1: Ubicación de la cuenca del Vilcanota

3.1.2. Aspectos físicos

3.1.2.1. Clima

El clima en la cuenca del Vilcanota se halla bajo la influencia macro-climática de grandes masas de aire provenientes de la selva sur oriental, del Altiplano, e incluso de región de la Patagonia. Los vientos que llegan del Altiplano peruano-boliviano son más bien fríos y secos, al igual que los que provienen de la Patagonia, ingresando por la zona sur oriental. Por otro lado, los vientos locales que se generan en sus valles y en sus llanuras tienen la función de distribuir calor y humedad a lo largo del día. Los

vientos de la selva sur implican inmensas masas de aire cargadas de humedad, que son impulsadas por los vientos alisios del oriente. La altitud en la que se encuentra la cuenca y su proximidad al ecuador genera una variedad de climas en los que se distinguen los siguientes tipos climáticos.

- **Climas Húmedos:** Corresponden a las zonas de selva baja, este tipo climático se extiende en la parte baja de la cuenca, presenta precipitaciones por encima de los 1 000 mm al año con temperaturas máximas alrededor de los 30 °C y mínimas alrededor de los 20 °C.
- **Climas Templados (húmedos y secos):** Climas de los valles interandinos que domina casi toda el área de la cuenca, la diferencia en humedad está marcada por la ubicación en la vertiente. Es decir, la cercanía al oriente implica más humedad, mientras que la proximidad al occidente implica mayor sequedad. Las zonas de clima templado son de vital importancia para el asentamiento de las poblaciones, presenta una precipitación aproximada de 500 a 1 000 mm al año con temperaturas máximas hasta de 29 °C y mínimas de 0 °C.
- **Climas Fríos (húmedos y secos):** Se dan en las zonas altas de los valles, en las punas y en las regiones que rodean a los glaciares; es decir, en áreas que se encuentran por encima de los 4 000 msnm., presenta una precipitación aproximada de 900 a 1 600 mm al año con temperaturas máximas hasta de 10 °C y mínimas bajo los 0 °C.

Información de la distribución espacial de la precipitación anual y temperatura mínima y máxima puede apreciarse en la figura 3.2. Los datos fueron extraídos del producto PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observation). PISCO presenta una serie de datos hidroclimáticos (erosión, evapotranspiración, precipitación y temperatura máxima y mínima) a buena escala espacial (0.05) y paso mensual para el periodo de 1981-2014, su generación está basada en técnicas geoestadísticas, información in situ y datos de sensoramiento remoto.

3.1.2.2. Hidrografía e hidrología

El río Vilcanota se origina a 5 443 msnm, en el abra de La Raya (nevado Cunuruna), ubicado en la cordillera oriental de los Andes, con una pendiente promedio en el cauce principal de 0.77%, una longitud desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Yanatile, aproximada de 409.3 Km.

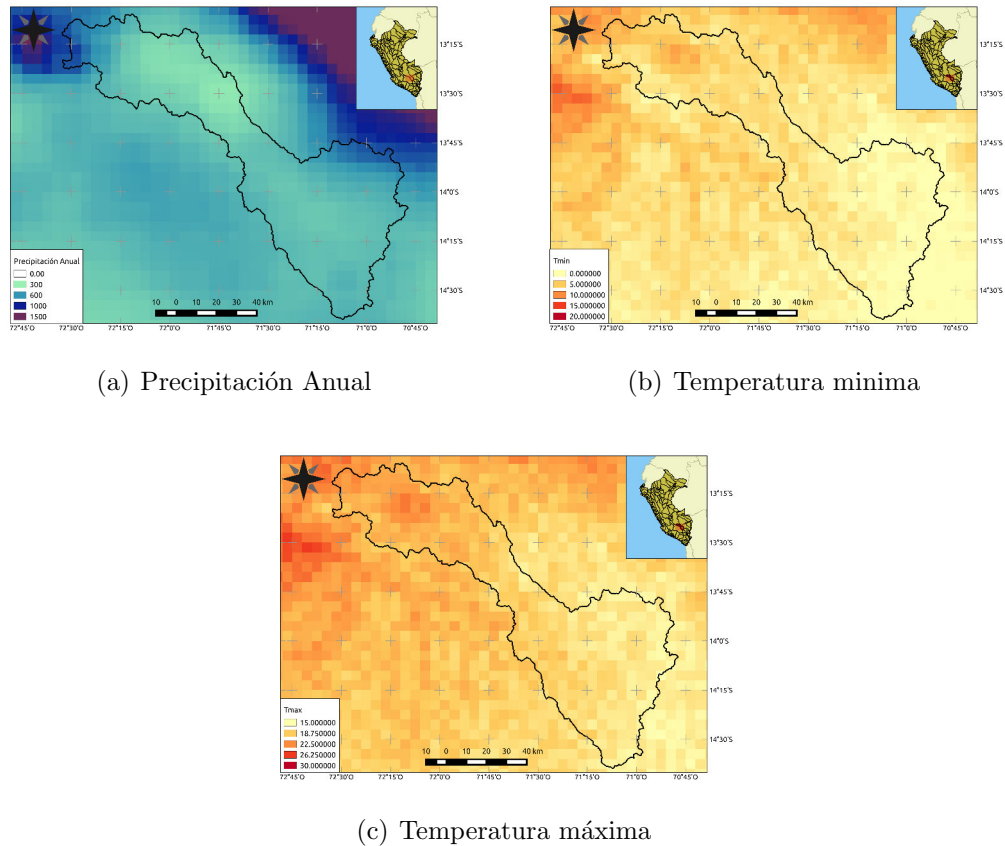


Figura 3.2: Climatología de las mencionadas variables hidroclimáticas.

Generado a partir de <ftp://ftp.senamhi.gob.pe/>

Se han identificado 9 sub-cuencas (figura 3.3), que serán descritas brevemente:

- **Subcuenca del río Hercca:** Se encuentra en la zona sur de la cuenca principal, perteneciente a las provincias de Canas y Canchis. Dentro de su extensión se encuentran la laguna Languilayo.
- **Subcuenca del río Sallca:** Ubicada al sureste de la cuenca principal y políticamente pertenece a la provincia de Canchis. Es la subcuenca de mayor extensión, esta es la subcuenca en donde las pasturas han sufrido mayores alteraciones, variando su receptividad y soportabilidad, debido al efecto del ganado sobre la vegetación.
- **Subcuenca del río Pitumarca:** Presente en la zona sureste de la cuenca del río Vilcanota, contigua a la del río Sallca, pertenece políticamente a la provincia de Canchis. En esta cuenca, al igual que en las anteriores, los cauces naturales no han sufrido modificaciones naturales e inclusive en la zona baja

hay presencia de pendientes de moderadas a fuertes, presentando así una densidad de drenaje baja.

- **Subcuenca Chuquicahuana:** Ubicada al suroeste de la cuenca principal y perteneciente políticamente a las provincias de Canas y Acomayo, aquí encuentran tres de las lagunas más importantes de todo el ámbito de estudio, que captan el drenaje de la zona y luego lo descargan al río Vilcanota: Pomacanchi, Pampamarca (Tungasuca) y Asnacocha.
- **Subcuenca del río Quiquijana:** Representa el inicio del estrangulamiento de la cuenca del río Vilcanota y abarca zonas que administrativamente corresponden a las provincias de Quispicanchi y Paucartambo.
- **Subcuenca del río Huatanay:** Ubicada en la zona central de la cuenca principal, pertenece políticamente a las provincias de Cusco, Quispicanchi y Calca. Esta es la subcuenca en donde los cambios de ocupación de suelo son más notorios ocasionados principalmente por crecimiento urbano de la ciudad de Cusco.
- **Subcuenca del río Pisac:** Se encuentra ubicada de manera contigua a la subcuenca Machu Picchu y la subcuenca del río Huatanay. Abarca territorios de las provincias de Cusco, Calca y Quispicanchi. En esta zona los cauces naturales han sufrido algunas modificaciones artificiales, como obras de protección ribereña, específicamente el río Vilcanota, al atravesar las zonas urbanas de Pisac y San Salvador.
- **Subcuenca del río Huarcocondo:** Pertenece políticamente a las provincias de Anta, Cusco y Urubamba, se forma de la confluencia de los ríos Cachimbo y Pitumarca.
- **Subcuenca Machu Picchu:** Ubicada en forma contigua a las dos anteriores, pertenece políticamente a la provincia de Urubamba. Presenta diversos afluentes principales entre los que podemos mencionar a los ríos Sillque y Cusichaca.

3.1.2.3. Fisiografía

La cuenca del Vilcanota está caracterizada por su verticalidad y altitud considerable creando un efecto de barrera entre el lado oriental y occidental de los andes, las geoformas que predominan son el resultado de la interacción de

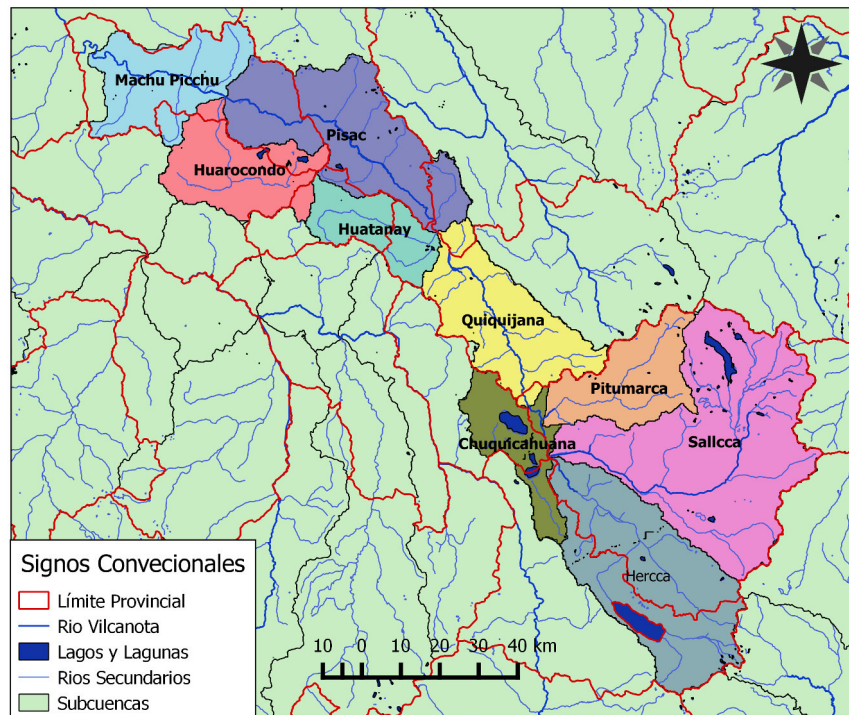


Figura 3.3: Subcuencas hidrográfica del Vilcanota

factores tectónicos, orogénicos y litológicos, así como también de agentes erosivos y climáticos.

Este análisis ha permitido establecer que se identifiquen tres grandes paisajes: planicies, colinas y montañas.

- **Gran paisaje montañoso:** Esta paisaje es el que predomina en mayor proporción a lo largo de toda la cuenca, se ha formado debido a procesos estructurales dominados por la acción combinada de movimientos orogénicos y epirogénicos de levantamiento y a la acción modeladora de la erosión pluvial, los que poco a poco fueron formando importantes estratos potentes de tal material, por los procesos de diagénesis se consolidaron y posteriormente por acción del levantamiento de la cordillera de los andes, se originó este gran paisaje, caracterizado por presentar actualmente superficies con ondulaciones pronunciadas que le confieren un aspecto corrugado de intensidad variable.
- **Gran paisaje de colinas:** Está dominada por aquellas tierras que en su conjunto están conformadas por elevaciones prominentes entre altitudes mayores a 20 metros y menores a 300 metros sobre el nivel de base local, caracterizadas por presentar una topografía abrupta, con relieves accidentados y pendientes fuertemente inclinados a empinados (8-50 %), que se localizan cerca o a continuación de las estribaciones montañosas.

- **Gran paisaje de planicies:** Se ha formado directamente por la acción demoledora y deposicional del agua de los ríos, quebradas y demás cursos, quienes han modelado al macizo rocoso hasta llegar a su actual configuración, así como por la acción demoledora y deposicional de los glaciares, quienes han modelado al material original hasta llegar a su actual configuración.

Según el mapa fisiográfico del 2 000 generado por el Instituto de Recursos Naturales (INRENA) la cuenca presenta los siguientes sub-paisajes (ver figura 3.3).

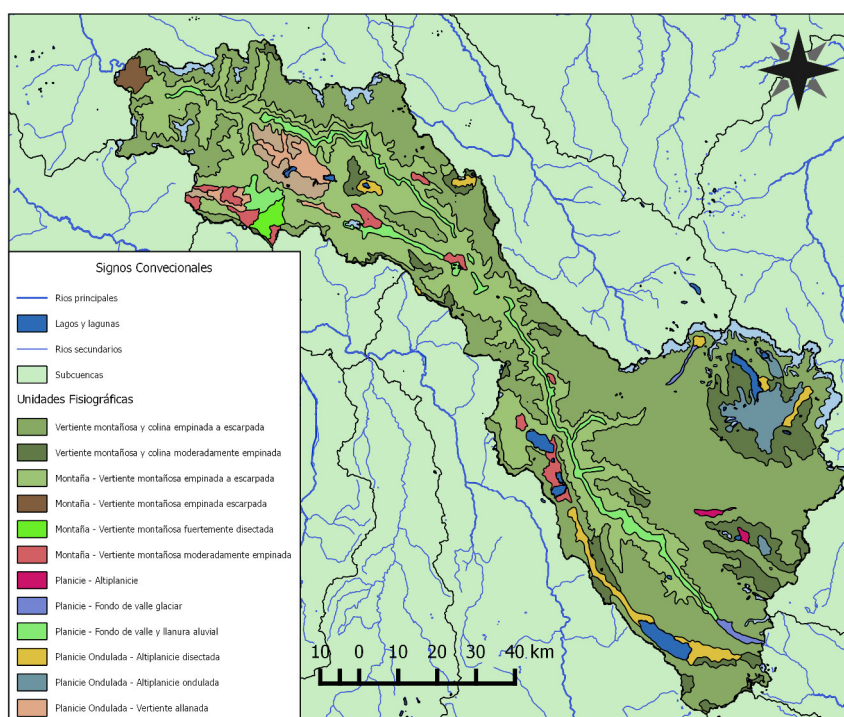


Figura 3.4: Unidades fisiográficas presentes en la Cuenca del Vilcanota

3.1.2.4. Geología

Las formaciones geológicas presentes en la cuenca del río Vilcanota pueden dividirse según la época de su formación en:

- **Cuaternario**
 - **Depósitos fluviales.** Son originados por la acción erosiva y de sedimentación del río Vilcanota durante el cuaternario. Estos depósitos se encuentran a todo lo largo del valle, compuestos por depósitos conglomerádicos, capas de suelos orgánicos, depósitos de arcillas y limos de baja potencia; así como gravas de grano fino a grueso y arenas

cuarzosas medias distribuidos en terrazas a lo largo del valle en la parte donde se ubican los poblados de Calca y Urubamba. Estos depósitos están cubiertos por flujos de lodo y limos arenoarcillosos de color marrón oscuro.

- **Depósitos aluviales.** Podemos encontrar estos depósitos sobreyaciendo a los depósitos fluviales, conformados por flujos de barro a manera de conos aluviales en las pequeñas quebradas del valle, con presencia de cárcavas de material anguloso y matriz limo-arcillosos finos, de colores rojizos a marrón oscuro.

■ Paleógeno

- **Grupo San Jerónimo.** Podemos encontrarlo desde el sector de Huarán, aproximadamente, hasta la capital de provincia que es la ciudad de Urubamba. Compuesta por areniscas gruesas y medias cuarzo feldespáticas intercaladas con lutitas rojas.

■ Cretáceo

- **Formación Maras.** Podemos encontrarlo desde el distrito de Huayllabamba hasta la ciudad de Urubamba; en esta zona la Formación Maras aflora como parte del Grupo Yuncaypata, ésta yace concordantemente a la Formación Paucarbamba. Se trata de una secuencia caótica como una mezcla de yesos, lutitas y escasas calizas, se estima que tiene un grosor de 100 y 200 metros y se le asigna una edad Albiano Medio (Cretáceo inferior).
- **Miembro Maras I.** Se encuentra en la base de la columna estratigráfica y está conformado por estratos de yeso, con escasos horizontes de arcillitas y limonitas rojas o areniscas rojizas. **Miembro Maras II.** Subyace al miembro Maras I. Este miembro está compuesto mayormente de areniscas rojizas de grano fino a medio con escasos horizontes arcillo-limosos.
- **Miembro Maras III.** Se compone mayoritariamente de secuencias alternantes de lutitas y limonitas, en horizontes delgados, las secuencias arcillosas presentan coloración verdosa y se puede observar también escasos niveles de areniscas y abundante contenido de yeso entre las capas.

Según el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET), en la cuenca del río Vilcanota existen 21 formaciones geológicas (ver figura 3.4), una pequeña descripción de cada clase puede verse en el anexo del presente documento.

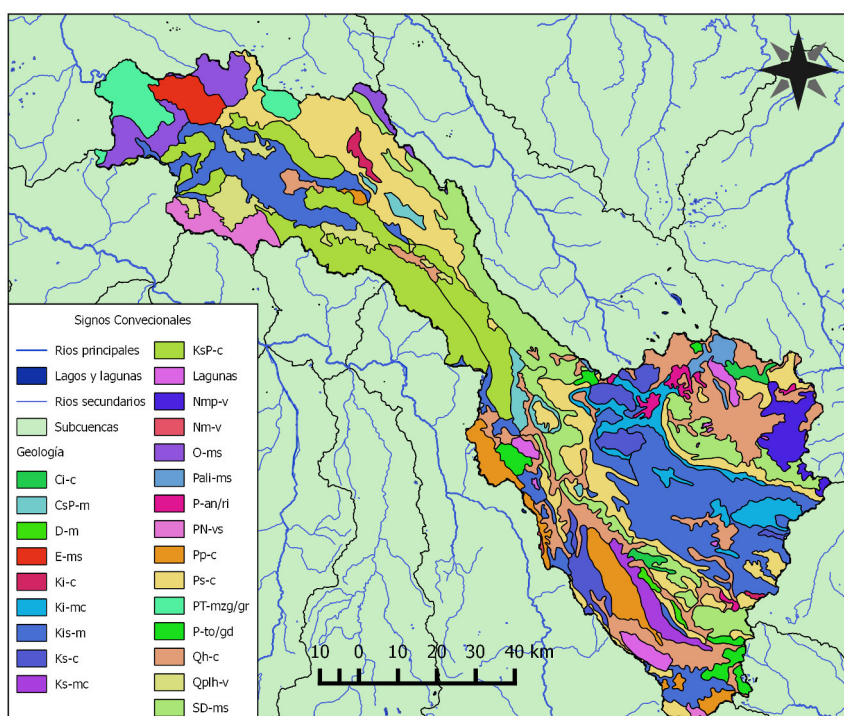


Figura 3.5: Formaciones geológicas presentes en la Cuenca del Vilcanota

3.1.3. Aspectos Biológico

3.1.3.1. Zonas de vida

Las zona de vida como tal, es una división en partes ecológicamente equivalentes, de los rangos climáticos naturales en que se ha dividido el globo terrestre. Se determinan por rangos cuantitativos de biotemperatura media anual, la precipitación promedio anual y la relación de evapotranspiración potencial, factores que muestran una interacción e independencia, cuya acción se refleja en la vegetación natural de la zona de vida. Se considera que estos factores ejercen un dominio sobre la fisionomía de la vegetación natural y de las formas biológicas reunidas en ella a pesar de la acción local de los factores geomórficos, edáficos, bióticos y atmosféricos (Tosi, 1960).

En la cuenca del Vilcanota se han identificado 10 zonas de vida (figura 3.5), que se describen a continuación.

- Bosque húmedo – Premontano Subtropical (bh-PS).
- Bosque muy humedo – Montano Bajo Subtropical (bmh – MBS).
- Bosque pluvial – Subalpino Subtropical (bp – MS).
- Bosque seco – Montano Bajo Subtropical (bs – MBS).

- Estepa – Montano Bajo Subtropical (e-MBS).
- Estepa espinoso – Montano Bajo Subtropical (ee-MBS).
- Nival - Subtropical (n - S).
- Páramo muy humedo - Subalpino Subtropical (pmh - SaS).
- Páramo pluvial - Subalpino Subtropical (pp - SaS).
- Tundra pluvial – Alpino Subtropical (tp – AS).

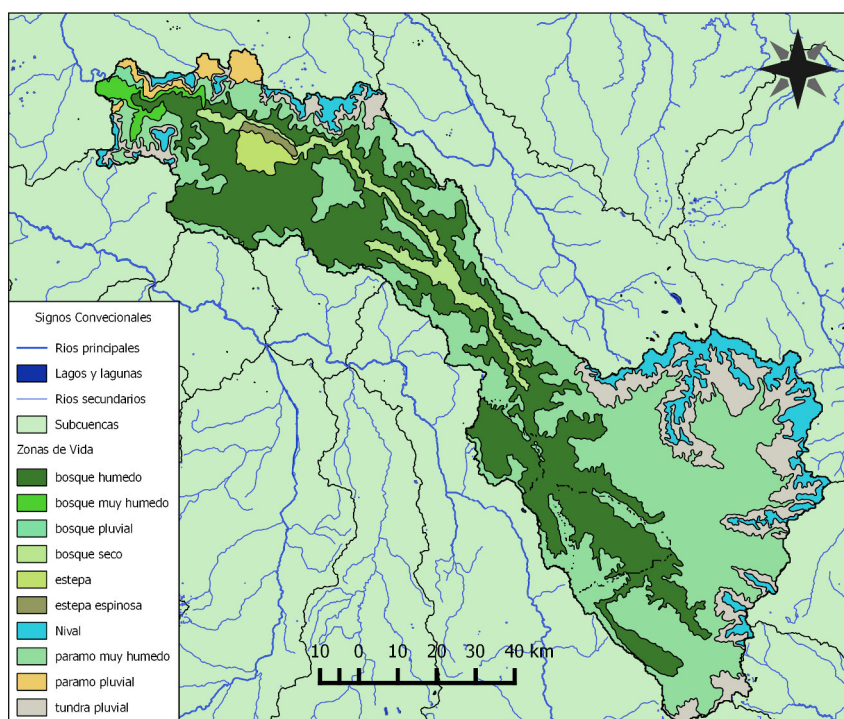


Figura 3.6: Zonas de vida para la cuenca del Vilcanota. Información obtenida del INRENA.

3.1.3.2. Flora

La Cuenca del Vilcanota por sus variadas condiciones fisiográficas y climáticas propician una variedad de ecosistemas, donde la flora tiene un alto grado de endemismo y se distribuye a través de la gradiente altitudinal, desde el piso de valle a 2700 m hasta los suelos crióturbados en la línea de los picos nevados a 4900 m. Los diversos estudios botánicos realizados en el ámbito de estudio documentan 2351 especies de plantas incluidas las vasculares y no vasculares considerando a la

cordillera del Vilcanota como centro de diversidad específica del género *Polylepis* con 6 de las 10 especies registradas para el Perú.

La flora representativa se puede dividir en las siguientes formaciones vegetales, como son: a) Piso nival, b) Línea ecotónica y pajonal de puna, c) Vegetación arbórea, arbustiva y herbácea, d) Bosque húmedo de montaña. Otro ecosistema característico de la cuenca es el Bosque de *Polylepis* que contiene una fauna y flora única, como son las aves *Cinclodes aricomae* y *Leptasthenura xenothorax*. Además se le considera uno de los hábitats más vulnerables de los altos Andes por la fuerte presión antropogénica existente (tala para leña y materiales de construcción además de sobrepastoreo), ya que constituyen el único recurso maderable en esas alturas (Tupayachi, 2005).

3.1.3.3. Fauna

Para la Cuenca del Vilcanota no existen registros completos que cubra toda su extensión. Sin embargo, los esfuerzos de investigación se han centrado principalmente en el Santuario Histórico de Machupicchu, y en el valle Sagrado de los Incas, dejando un vacío de información para la parte alta de la cuenca.

Para el Santuario Histórico de Machupicchu se han registrado hasta el momento un aproximado de 523 especies, los cuales incluyen 13 especies de peces, 12 de anfibios, 22 de reptiles, 423 de aves y 53 de mamíferos; 125 familias de artrópodos, 3 especies de moluscos y una especie de onicophoro (Servat et al., 2015).

3.1.4. Aspectos socioeconómicos

Para el análisis del componente socioeconómico de la cuenca del río Vilcanota, se parte del conocimiento de las provincias involucradas territorialmente a la cuenca, tales como Calca, Urubamba, Anta, Cusco, Paucartambo, Quispicanchi, Acomayo, Canchis y Canas. El ordenamiento territorial de la región se caracteriza por la desarticulación entre la capital (Cusco) y las demás provincias y ciudades importantes (Sicuani y Quillabamba), lo que limita su desarrollo. En contra posición destaca su gran riqueza ecológica por lo que existe gran potencialidad entre los pisos alto andino, valle interandino y ceja de selva para emprender grandes proyectos de desarrollo. Canchis es la provincia con mayor área territorial (44.7 %) y está integrada por 8 distritos, los que hacen un total de 3,999.27 km², mientras que las provincias de Paucartambo y Acomayo son las que tienen las menores áreas, 255.86 y 275.56 km², respectivamente (ver figura 3.6).

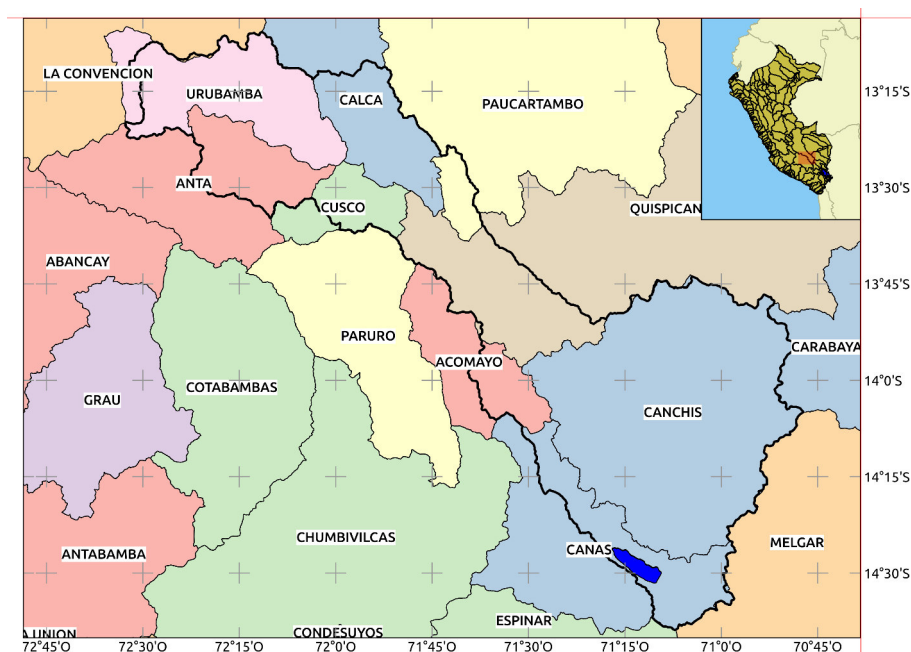


Figura 3.7: Provincias que se encuentran dentro del ambito de estudio

3.1.4.1. Aspectos Demográficos

Según los resultados del Censo de Población y Vivienda del año 2 005, la cuenca del rio Vilcanota cuenta con aproximadamente 154,322 viviendas, de las cuales más del 17 % se encuentran en el distrito de Cusco. Las provincias que más han crecido en el período 1 940 – 2 005 son las ubicadas en la sub cuenca del Huatanay, es decir en el ámbito donde se desarrolla la actividad turística. De otro lado, las provincias de la cuenca alta, donde prevalece la actividad agropecuaria, han presentado un crecimiento lento y en algunos distritos hasta con crecimiento poblacional negativo en este mismo período.

3.1.4.2. Indicadores de Pobreza

Según el último reporte de las Naciones Unidas del Índice de Desarrollo Humano (IDH), el distrito de Pisac se ubica en el último lugar de los distritos del ámbito de estudio, ocupando el puesto 1 624 a nivel nacional. Así también en esperanza de vida al nacer, alfabetismo, logro educativo, ingreso familiar, ocupa los últimos lugares respecto a los otros distritos. Si consideramos que de 1828 distritos que tiene el Perú, Pisac ocupa el puesto 1 624, esto es representativo del grado de pobreza de sus pobladores.

De acuerdo al IDH la pobreza distrital en orden descendente del más pobre al menos pobre es de la siguiente manera: Pisac (1 624), Chinchero (1 378),

Ollantaytambo (1 342), Calca (927), Urubamba (887) y Machu Picchu (726). En resumen, el limitado acceso y deficientes servicios básicos, el alto porcentaje de desnutrición infantil, la alta tasa de analfabetismo femenino y los bajos ingresos, caracterizan de por sí la pobreza que existe en el ámbito de estudio.

3.1.5. Aspectos Económicos

Los principales corredores económicos de la región giran en torno a las actividades productivas y comerciales concentradas en las ciudades de Cusco, Sicuani y Quillabamba. Para el caso de la actividad agrícola, el circuito comercial se basa en el maíz (Maíz Gigante Blanco), café y cacao. La ganadería tiene presencia relevante en las provincias altas. En el caso del ganado vacuno, su carne beneficiada o en pie, se orienta a los mercados de las ciudades de Cusco, Arequipa y Lima. La producción agroindustrial constituida por harinas de trigo, cebada y maíz, así como mermeladas y néctares de fruta surten al mercado local y también a Puno y ciudades fronterizas de Bolivia.

El año 2003, la Red Vial de la Región Cusco tenía una longitud de 5,435.43 Km., correspondiendo a la Red Vial Nacional el 14.9 %, a la Red Vial Departamental el 32.0 % y a la Red Vecinal el 53.1 %. Del total, el 8.5 % estaba asfaltada, el 40.5 % afirmada, el 17.7 % sin afirmar y el 33.3 % eran trochas.

Los principales corredores económicos de la Región son:

- Sicuani - Cusco - Urubamba - Quillabamba - Ivochote.
- Cusco - Anta - Limatambo.
- Cusco - Paucartambo - Pillcopata
- Sicuani - Espinar - Chumbivilcas
- Cusco - Pacarectambo - Santo Tomás
- Urcos - Ocongate - Quincemil
- Cusco - Calca - Amparáes - La Quebrada - Quellouno.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Construcción de la base de datos

4.1.1. Datos necesarios para el modelado hidrológico

El modelamiento hidrológico puede realizarse utilizando diferentes conjuntos de datos de suelos, coberturas vegetales, etc. Sin embargo, cabe resaltar que algunos de ellos se necesitan independientemente del mecanismo de modelado que se esté utilizando. Un buen modelo hidrológico tiene que responder a algunas preguntas muy importantes para ser útil a las autoridades locales en la planificación territorial, diseño hidráulico o para evaluar los daños causados por los fenómenos extremos que se presentasen.

La primera y más importante pregunta es: “¿De dónde viene el flujo de agua?”, para responder a esta pregunta se puede utilizar un modelo de elevación digital del área de estudio, este conjunto de datos, luego de un procesamiento previo, brinda información sobre las direcciones que puede tomar el flujo de agua y bajo una correcta aplicación de umbrales se puede estimar la red de drenaje.

La segunda cuestión, más compleja y que requiere operaciones más complicadas, es “¿cuánta agua fluye?”, aquí se parte del planteamiento del balance hídrico para el área de estudio, cabe resaltar que la calidad de los datos de entrada es vital a la hora de realizar dicha tarea. Por lo general, estos datos incluyen la precipitación, evapotranspiración, intercepción, características de la cobertura de la tierra y datos sobre tipo de suelo. Si se considera el flujo de agua subterránea, los datos también pueden incluir características hidrogeológicas del terreno, humedad del suelo y la descripción del acuífero. El resultado final de esta etapa es la cantidad de agua disponible después de las lluvias en cada URH o celda (depende del enfoque de modelamiento aplicado, este punto es discutido en el capítulo 2 de la presente tesis).

La tercera cuestión, que da el resultado final y es la parte más importante de un modelo hidrológico es “¿Cuál es el caudal que genera el escurrimiento en todos los puntos de interés de la ruta de flujo?”. Esto se resuelve utilizando un método de enrutamiento; en el presente estudio se utiliza el modelo SWAT que utiliza el método de enrutamiento de Muskingum agregado. A continuación se presenta la información utilizada para la caracterización del área de estudio y la simulación hidrológica.

4.1.2. Cartografía Temática del área de estudio

Esta información contribuyó a la realización de la caracterización del río Vilcanota. Se recurrió a la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), del Instituto de Recursos Naturales (INRENA) hoy Ministerio del Ambiente (MINAM), del Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET) entre otros.

La información que se priorizó estuvo referida al tipo de suelo y cobertura vegetal. Los mapas revisados son los siguientes:

- Mapa de Cobertura vegetal del Perú 2012 (MINAM).
- Mapa de cuenca hidrográficas 2009 (ANA).
- Mapa de tipo de suelos del Perú 2009 (INRENA).
- Mapa geomorfológico 2000 (INRENA)
- Mapa Geológico del Perú 1999 (INGEMMET).
- Areas Naturales Protegidas del Perú (SERNANP).
- Mapa de Zonas de Vida del Perú (ONERN)

4.1.3. Modelo Digital de Elevación (MDE)

El conocimiento del factor topográfico es un insumo básico para comprender gran parte de los procesos ocurridos en la superficie de la tierra, en nuestra área de estudio y en el Perú en general se cuenta con tres productos que brindan información altimétrica de libre acceso: la carta nacional del IGN a la escala 1:100 000, el MDE a partir de técnicas interferométricas, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), y el MDE a partir de técnicas estereoscópicas, Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer (ASTER). A pesar de que la información altimétrica expuesta presentan rangos de precisiones conocidos, son muchos los autores que señalan que esta dependerá finalmente de las condiciones locales presentes en el área

de estudio (Kiammehr and Sjöberg, 2005; Schumann et al., 2008; Nikolakopoulos et al., 2006).

Si bien se pudo trabajar con cualquiera de los datos antes expuestos, se optó finalmente por utilizar el producto SRTM debido a su mayor precisión en terrenos escarpados y mayor aplicación en investigaciones hidrológicas (Satgé et al., 2015; Ludwig and Schneider, 2006).

El MDE SRTM v.4.1 fue obtenido a través del enlace <http://srtm.csi.cgiar.org/> (ver Figura 4.1), esta versión incorpora los métodos de interpolación descritos por Reuter et al. (2007) para la complementación de las zonas sin información producto de sombras muy espesas y lagunas, se descargado en un formato raster GeoTIFF a partir de mosaicos provistos de 5°x 5°, los cuales fueron adaptados en un a una sola imagen, el MDE para el ámbito de estudio puede observarse en la figura 4.2.

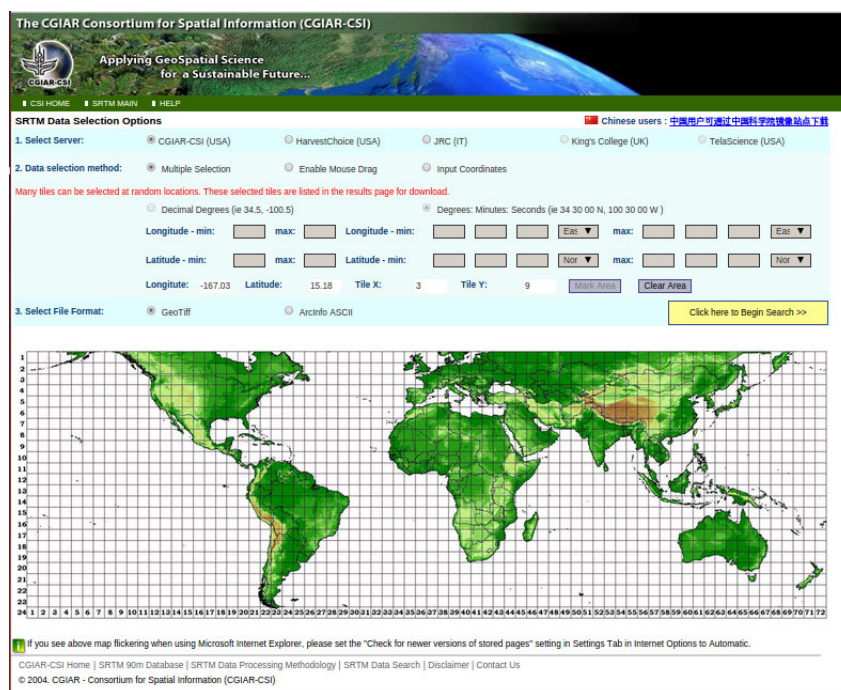


Figura 4.1: Portal de descargas del MDE SRTM 4.1

La información de la red hídrica fue obtenida del MDE pero a su vez contrastada con la red hídrica realizada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

4.1.4. Datos hidrometeorológicos e hidrométricos

Los datos hidrometeorológicos fueron obtenidos a través del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Se seleccionaron 21 estaciones meteorológicas, de las cuales todas contaban con registro de precipitación y solo 10

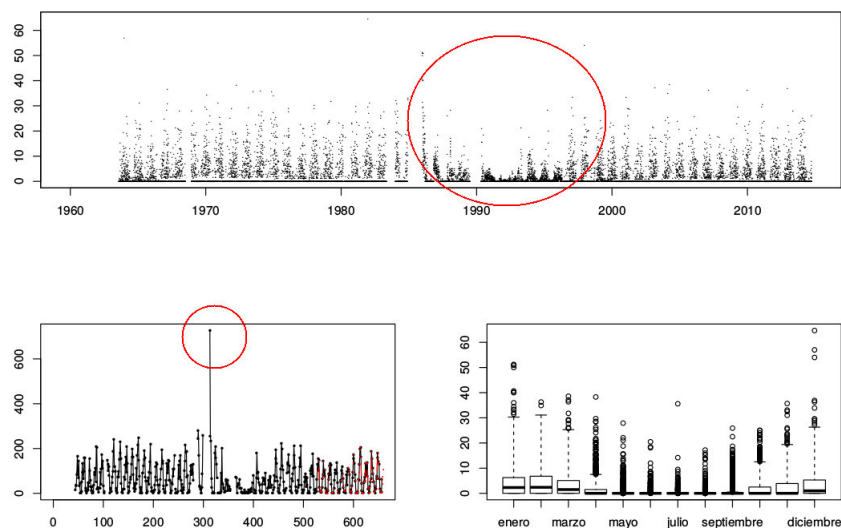


Figura 4.3: Registro pluviométrico de la estación Zurite, en la figura superior observamos el registro diario, la figura inferior izquierda representa los datos mensualizados y la figura inferior derecha el diagrama de cajas de los datos diarios.

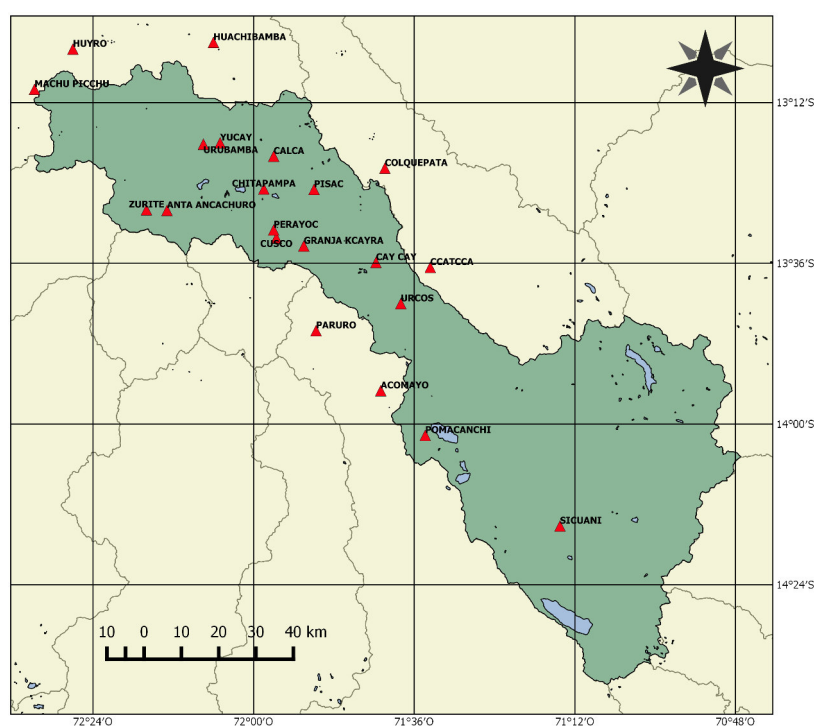


Figura 4.4: Estaciones consideradas para el estudio

GlobeLand30 cubre el área entre los 80°N y 80°S, y los mosaicos se organizan por dos métodos. Los mosaicos de datos de tamaño de 5°(latitud) x 6°(longitud) ubicados entre los 60°N y 60°S, de tamaño de 5°(latitud) x 12°(longitud) dentro de los 60°a 80°de latitud norte y sur. El sistema ofrece la descarga gratuita en línea

Cuadro 4.1: Imágenes Landsat adquiridas

Imagen	Adquisición	Path/Row	
Landsat 5 TM	1988-08-25	469	Composición para 1988
Landsat 5 TM	1988-08-18	370	
Landsat 5 TM	1988-08-25	470	
Landsat 5 TM	2001-08-13	469	Composición para 2001
Landsat 5 TM	2001-08-06	370	
Landsat 5 TM	2001-08-13	470	
Landsat 8 OLI	2014-08-25	469	Composición para 2014
Landsat 8 OLI	2014-09-06	370	
Landsat 8 OLI	2014-08-25	470	

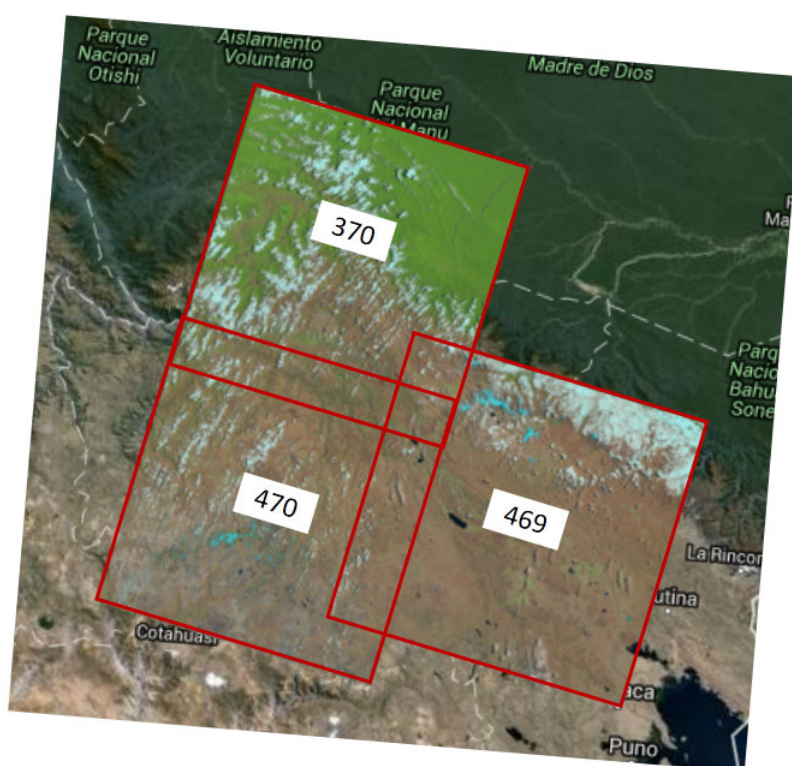


Figura 4.5: Ubicación de las imágenes descargadas

para las instituciones de investigación y organizaciones de bienestar público. Los pasos para la obtención del GlobalLand30 se puede apreciar en la figura 4.6.

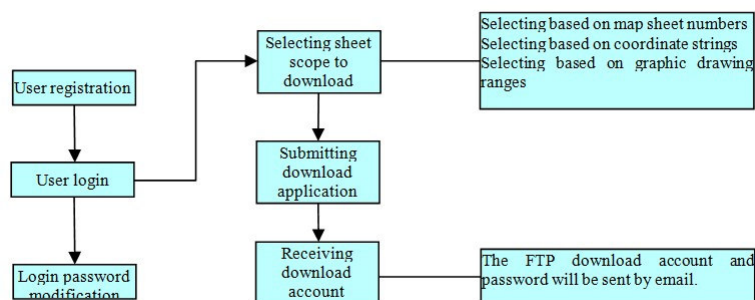


Figura 4.6: Pasos para la obtención del producto GlobalLand30

4.1.5.1. Adecuación de la base de datos de cobertura del suelo al modelo hidrologico SWAT

Se relacionó las clases encontradas en la clasificación de las imágenes Landsat con la base de datos SWAT que está conformado con los tipos de cultivo y cobertura más comunes (ver cuadro 4.2), esta información es importante ya que influye notoriamente en la evapotranspiración, interceptación y erosión superficial.

Cuadro 4.2: Adecuación de la base de datos GlobalLandCover30 a la base de datos del SWAT

	Descripción de las clases encontradas	Código SWAT	Descripción SWAT
Uso de Suelo	Cultivos	AGRL	Agricultural land-generic
	Vegetación arbustiva	FRST	Forest-mixed
	Pajonal-barbecho	PAST	Pasture
	Cuerpos de agua	WATR	water
	Casco Urbano	URHD	Residual High Density
	Lecho Rocoso	BARR	Barren
	Permanent snow and ice	WATR	water
Tipo de Suelo	Leptosol	18834	Leptosol
	Regosol	18835	Regosol
	Cambisol	18835	Regosol
	Andosol	188839	Luvisols

4.1.6. Datos de Tipo de Suelo

Los datos de tipo de suelo es quizás la información más complicada de obtener debido a su alto costo y excesivo trabajo de campo necesario. Debido a que escapa del presupuesto de la presente investigación se optó por el uso de la información

provista por el SoilGrids1km, esta es una colección de mapas sobre propiedades y clase de suelos actualizable del mundo con una resolución relativamente gruesa de 1 km este producto está basado en el perfil global de la tierra y datos de covarianza (Hengl and G, 2014).

Los datos WorldSoil1km pueden obtenerse del siguiente link <http://soilgrids.org/> o vía FTP <ftp://ftp.soilgrids.org/>, estos datos se obtienen en formato raster GeoTIFF a partir de mosaicos provistos de 10 x 10 °. La información de tipo de suelo para nuestro ámbito de estudio puede apreciarse en la figura 4.8.

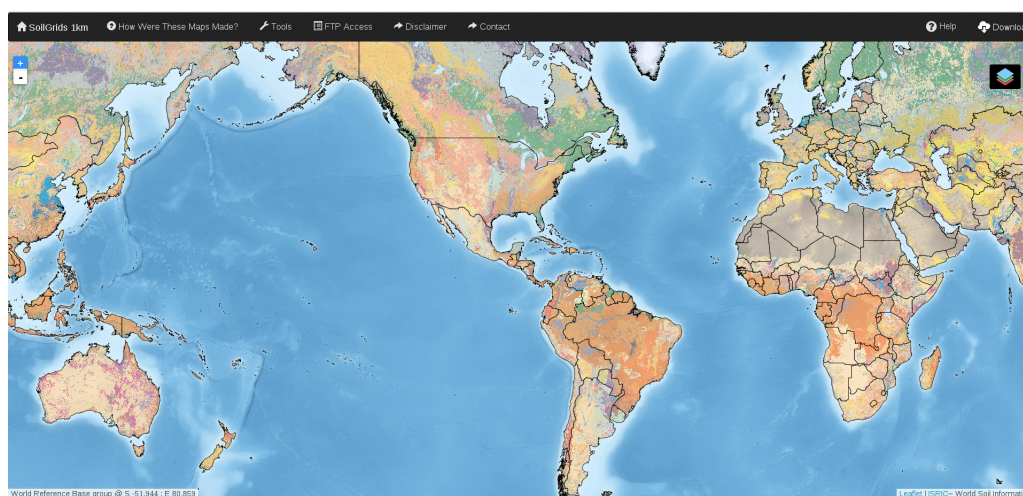


Figura 4.7: Portal de descargas del SoilGrids1km

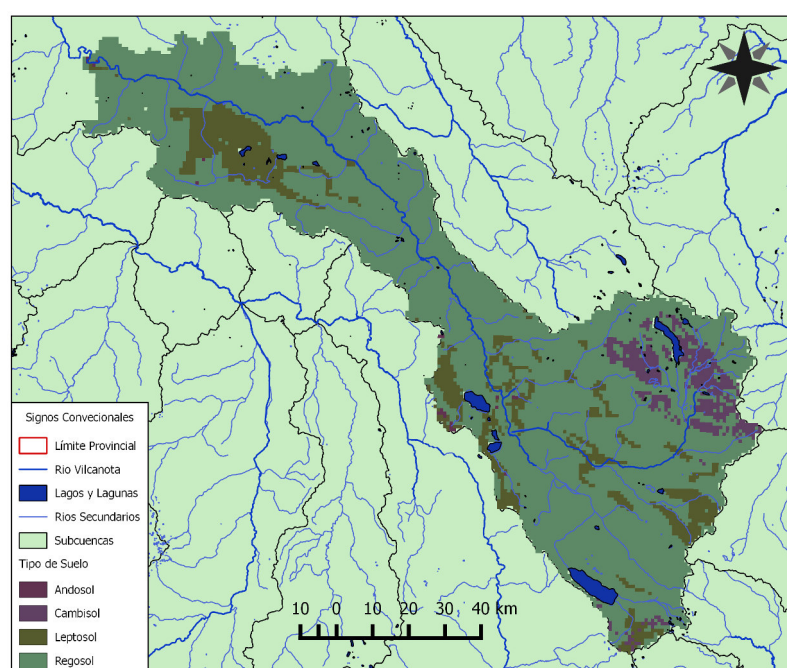


Figura 4.8: Información de tipo de suelo en la cuenca del río Vilcanota

4.1.6.1. Adecuación de los datos de tipo de suelo al modelo hidrológico SWAT

La base de datos de suelos utilizada por SWAT contiene información sobre las propiedades físicas de los suelos que rige el movimiento del agua y el aire a través del perfil, teniendo un impacto importante en el ciclo hidrológico. Debido a que la base nativa de tipo de suelo del SWAT no presenta datos claros de las clases generadas por el soilgrid1km se procedió a utilizar la base de datos mundial de suelos HWSD (Harmonized World Soil Database). Las variables requeridas en la base de datos de suelos de acuerdo con [Neitsch et al., 2005a](#) son las siguientes:

- **Numero de capas que contiene el perfil del suelo.** Se pueden ingresar de 1 a 10 capas.
- **Profundidad máxima de enraizamiento en el perfil del suelo (mm).** Es la suma total de cada una de las profundidades de las capas de perfil. Si no se especifica la profundidad, el modelo asume que las raíces se pueden desarrollar en la profundidad total del perfil.
- **La profundidad desde la superficie hasta la parte inferior de cada capa (mm).**
- **La densidad aparente húmeda (mg/m^3 o g/cm^3).** La densidad aparente del suelo expresa la relación entre la masa de partículas sólidas y el volumen total del suelo.

$$\rho_b = M_s/V_t \quad (4.1)$$

Donde ρ_b es la densidad aparente, M_s la masa de partículas sólidas y V_t el volumen total del suelo. Los valores de densidad aparente deberían estar entre 1.1 y 1,9 mg/m^3 .

- **Capacidad de agua disponible en la capa de suelo (mm del suelo $\text{H}_2\text{O}/\text{mm}$).** El agua disponible en plantas, también conocida como la capacidad de agua disponible, se calcula restando la fracción de agua presente en el punto de marchitez permanente a la capacidad de campo permanente:

$$AWC = FC - WP \quad (4.2)$$

Donde AWC es el contenido de agua de la planta, FC es el contenido de agua a capacidad de campo, y WP es el contenido de agua en el punto de marchitez permanente. La capacidad de agua disponible se calcula mediante

la determinación de la cantidad de agua liberada entre la capacidad de campo in situ (el contenido de agua del suelo a potencial mátrico, -0.033MPa) y el punto de marchitez permanente (el contenido de agua del suelo a potencial mátrico, -1.5 MPa).

- **Conductividad hidráulica saturada (mm/h).** La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), relaciona la proporción del flujo de agua y el gradiente hidráulico, y es una medida de la facilidad de movimiento del agua a través del suelo.
- **Contenido de carbono orgánico en el suelo (% del peso del suelo).** Es la porción de una muestra de suelo que pasa a través de un tamiz de 2 mm.
- **Contenido de arcilla (% del peso del suelo).** El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente y menor a 0.002 mm.
- **Contenido de limo (% del peso del suelo).** El porcentaje de partículas del suelo que tienen un diámetro equivalente entre 0.05 y 0.002 mm.
- **Contenido de arena (% del peso del suelo).** El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.
- **Contenido de fragmento de roca (% del peso del suelo).** El porcentaje de la muestra que tiene un diámetro de partículas superior a 2 mm.
- **Factor de erodabilidad del suelo (k_{usle}).** Esta propiedad define la pérdida de suelo por erosión hídrica.

4.2. Caracterización de la cobertura del suelo en la cuenca del Vilcanota

En esta sección se describe los pasos para la generación de mapas de ocupación y cobertura del suelo para los años 1988, 2001 y 2014 obtenido a través de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat, además, se detalla la metodología seguida para la generación de un escenario futuro según tendencias de evolución observadas. Se estudian las relaciones entre los cambios y las variables explicativas para modelar luego, estocásticamente, mapas futuros siendo el año horizonte 2030 (ver figuras 4.9, 4.13 y la figura 5 del anexo).

4.2.1. Procesamiento de Imágenes de Satélite

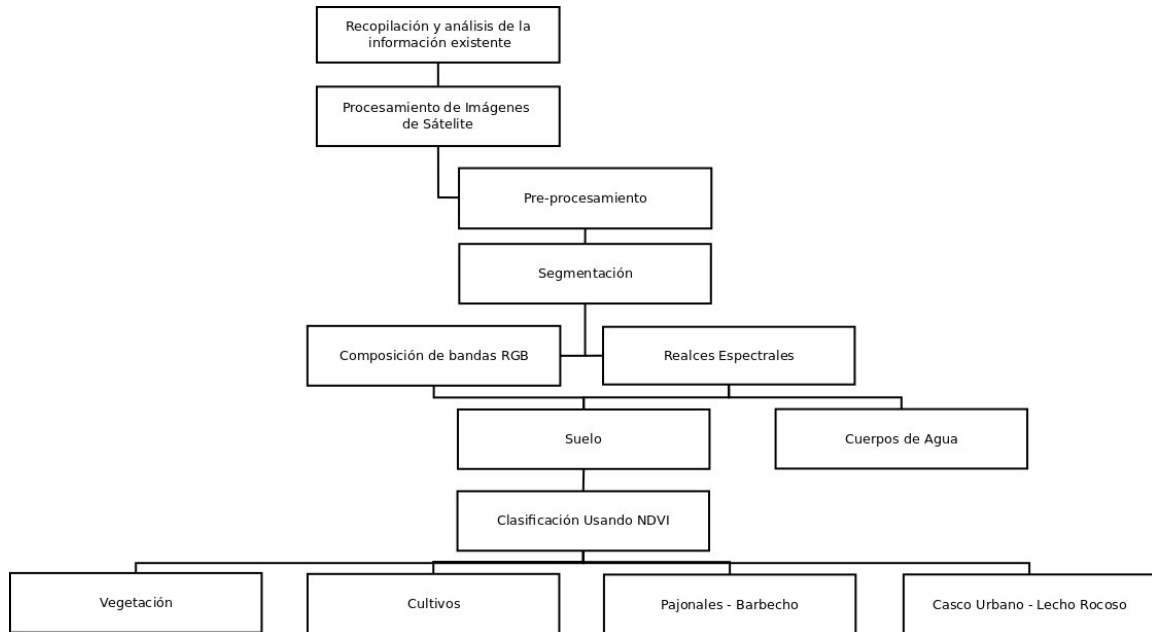


Figura 4.9: Metodología seguida para la generación de los escenarios de uso de suelo.

4.2.1.1. Preprocesamiento

El preprocesamiento de imágenes de satélite (figura 5.1), es el primer paso a realizar debido a una serie de interferencias o de errores (los cuales pueden ser radiométricos, geométricos y/o atmosféricos) durante su recepción, que perturban los datos que quiere analizarse. El objetivo del preprocesamiento es mejorar la calidad de la información para las 9 imágenes Landsat descargadas correspondientes a la época seca (ver capítulo 4 sección 1), no fue considerado una corrección geométrica a las imágenes utilizadas debido a que las imágenes ya vienen con un nivel de procesamiento L1T (Precision, Terrain Corrected), lo que significa que se les ha realizado una corrección geométrica usando puntos de control sobre el terreno (que provienen del conjunto de datos GLS2000) y un MDE (SRTM, NED, CDED, DTED y GTOPO 30), esta corrección no es del todo precisa pero es suficiente para los propósitos de esta investigación.

En primera estancia se realizó la conversión de los valores digitales (ND) a radiancia, aplicando la siguiente fórmula.

$$L = a_1 + a_0 * ND \quad (4.3)$$

Donde L hace referencia a la radiancia, a_0 pendiente o gain y a_1 es una constante llamada bias. Tanto a_0 y a_1 fueron obtenidos del header de la imagen. Luego se calculó la reflectancia al tope de la atmósfera TOA (indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada), utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho(\lambda) = L \cdot \pi \cdot d \cdot \cos(\theta) / E_i(\lambda) \quad (4.4)$$

Donde $\rho(\lambda)$ es la reflectancia al tope de la atmosfera, L la radiancia, d la distancia tierra-sol expresada en unidades astronómicas, $E_i(\lambda)$ irrancia solar y θ el ángulo cenital solar. Finalmente se corrige los valores de reflectancia mediante el método de sustracción de objeto oscuro (DOS), que asume que las áreas en una imagen de valores conocidos nulos de reflectancia (para el estudio se consideraron las lagunas profundas) deben presentar también valores nulos en la imagen satelital y de no cumplirse, la reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión (scattering) atmosférica, con estos valores y procedimientos aditivos se procede a calibrar el resto de la imagen.

4.2.1.2. Clasificación de Imágenes de Satélite

La clasificación de imagen hace referencia a la tarea de extraer clases de información de una imagen ráster multibanda. Para encontrar las clases correctamente especializadas se inició con el proceso de segmentación, que consta de un fraccionamiento en función a características de color, brillo, tonalidades y textura y de una combinación de los segmentos acorde con su vecino más cercano (Li et al., 2009; Blaschke, 2010). Se obtuvo los niveles de la segmentación considerando los tamaños de fragmentos por medio de una inspección visual, realizándose varias pruebas cambiando el rango de la fragmentación, hasta obtener el que más se ajustaba a la delimitación de las coberturas (ver figura 4.10).

Se emplearon 2 composiciones de bandas RGB 321 y RGB 452 para Landsat 5 y RGB 432 y RGB 543 para Landsat 8 con el fin de poder diferenciar entre cobertura de agua, nieve o hielo permanente y suelo, para esta tarea también se apoyó en la utilización de realces espectrales, con el fin de definir mejor el contraste entre las mismas (figura 4.9).

Una vez definida la cobertura del suelo sin considerar cuerpos de agua o nieve, se utilizó el Índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index o NDVI, por sus siglas en ingles Rouse Jr et al., 1974), este es un índice muy utilizado para evaluar la vegetación y los cambios en la cobertura del suelo (Sohl, 1999; Kindu et al., 2013). El índice de NDVI se obtiene mediante la

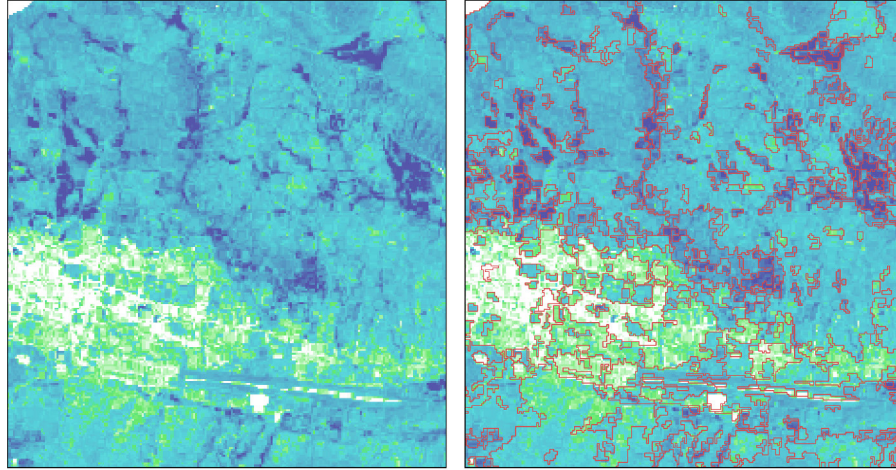


Figura 4.10: Segmentación de la imagen Landsat en la ciudad de Cusco

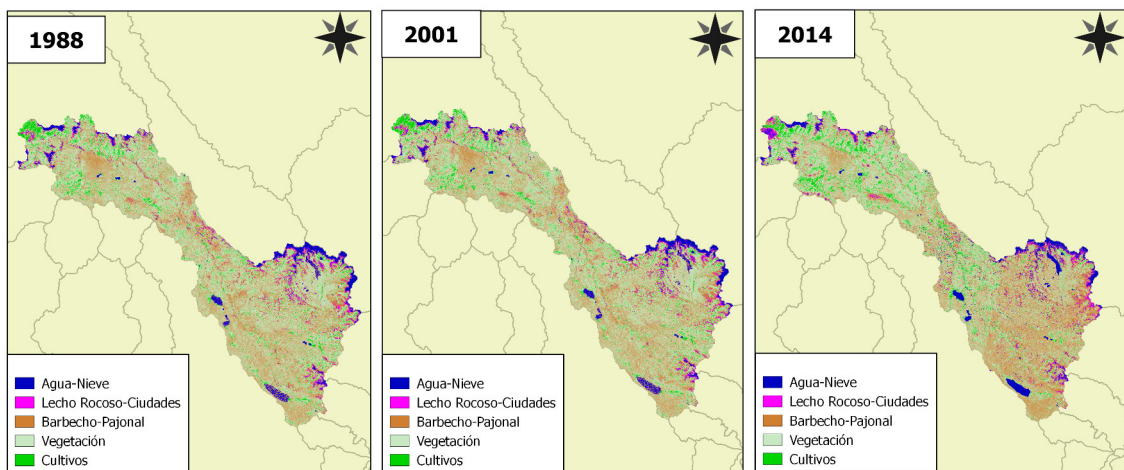


Figura 4.11: Mapa de uso de suelo generado para los años de 1988, 2001 y 2014 en la Cuenca del Río Vilcanota.

ecuación:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (4.5)$$

Donde IR se refiere a la banda infrarroja y R a la banda roja.

Las clases fueron determinadas usando el algoritmo de clasificación máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Classification o MLC, por sus siglas en ingles), identificándose 4 clases: Vegetación, cultivos, Pajonales-Barbecho, Casco Urbano-Lecho Rocoso, este proceso fue realizado para las imágenes correspondientes a las fechas 1988, 2001 y 2014. Los resultados pueden apreciarse en la figura 4.11.

4.2.2. Predicción de escenarios de cobertura del suelo

4.2.2.1. Detección de Cambios

El primer paso para la predicción de escenarios futuros de ocupación de suelo es cuantificar los cambios ocurridos en el pasado, para esta tarea se utilizan los mapas de cobertura del suelo de los años 1988, 2001 y 2014 previamente obtenidos, no obstante, se consideró invariantes las clases correspondientes a cuerpos de agua y cobertura nival debido a que sus procesos de cambio ocurren a otra escala de tiempo y debido a procesos físicos distintos y no de interés para los fines de la investigación. Los cambios ocurridos entre 1988 y 2001 para las clases restantes (Barbecho-pajonal, cultivos, vegetación arbustiva y casco urbano- lecho rocoso) pueden apreciarse en el cuadro 5.1. En el cuadro 5.2 apreciamos la tabulación cruzada entre las clases identificadas para las fechas 1988 y 2001, la diagonal principal representa las zonas en las que se presentó persistencia de la situación inicial; los valores restantes de la matriz, fuera de la diagonal principal, representan los cambios ocurridos. La ganancia de una categoría se determina restando el total de la fila menos el valor estable (persistencia) que se encuentra en la diagonal principal de dicha categoría temática. Los cambios netos se obtienen mediante la diferencia entre los totales de filas menos los totales de columnas de la tabulación cruzada, debemos considerar que los cambios netos no necesariamente representan todos los cambios ocurridos ya que existe el caso de que se pueda producir compensaciones entre los cambios ocurridos en dos lugares diferentes. El mapa obtenido para el año 2014 es utilizado para la validación y comparación del modelo predictivo propuesto.

Cuadro 4.3: Resumen del cambio de cambios observados 1998-2001

	1988 (km ²)	2001 (km ²)	Δ	1988 %	2001 %	Δ %
Casco Urbano- Lecho rocoso	392.23	443.05	50.82	4.074	4.601	0.527
Barbecho- Pajonal	5551.22	5329.52	-221.7	57.659	55.357	-2.303
Cultivos	1911.63	2194.21	282.58	19.856	22.791	2.935
Vegetación arbustiva	1772.52	1660.82	-111.7	18.411	17.251	-1.160

Una vez cuantificados los cambios entre los dos años analizados (1988 y 2001), cada uno de ellos fue considerado como un submodelo independiente de transición ya que lo más probable es que cada cambio ocurrido obedezca a factores particulares, diferentes según el caso y éstos serán modelados en función a variables explicativas

Cuadro 4.4: Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 1998 y 2001

	Casco Urbano- Lecho rocoso	Barbecho- pajonal	Cultivos	Vegetación arbustiva	Total
Casco Urbano- Lecho rocoso	190.82	170.32	18.56	12.53	392.23
Barbecho- pajonal	8.16	5329.29	178.83	34.94	5551.22
Cultivos	3.72	323.72	1511.81	72.38	1911.63
Vegetación arbustiva	1.73	14.126	12.32	1742.91	1772.52
Total	204.43	5838.89	1721.52	1862.76	9627.6

mediante una RNA (ver figura 4.12). Si analizamos también los cambios ocurridos para las fechas 2001 y 2014 observamos que se obedecen las mismas tendencias de cambio que se presentaron para los años 1988 y 2001 (cuadros 4.4 y 4.5).

Cuadro 4.5: Resumen del cambio de cambios observados 2001-2014

	2001 (km ²)	2014 (km ²)	Δ	2001 %	2014 %	Δ %
Casco Urbano- Lecho rocoso	204.43	392.23	187.8	2.123	4.074	1.950
Barbecho- Pajonal	5838.89	5251.22	-587.67	60.647	54.543	-6.104
Cultivos	2221.52	2511.63	290.11	23.074	26.087	3.013
Vegetación arbustiva	1362.76	1472.52	109.76	14.154	15.294	1.140

Cuadro 4.6: Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 2001 y 2014

	Casco Urbano- Lecho rocoso	Barbecho- pajonal	Cultivos	Vegetación arbustiva	Total
Casco Urbano- Lecho rocoso	372.42	48.64	10.41	11.58	443.05
Barbecho- pajonal	10.16	5219.66	53.57	46.13	5329.52
Cultivos	5.42	247.72	1841.11	99.96	2194.21
Vegetación arbustiva	4.23	35.2	6.54	1614.85	1660.82
Total	392.23	5551.22	1911.63	1772.52	9627.6

4.2.2.2. Variables Explicativas

Las variables explicativas son las encargadas de explicar los cambios de uso de suelo, debemos tener presente que los cambios de cobertura del suelo son el resultado de la interacción de múltiples factores que varían en el tiempo y el espacio según específicas condiciones humanas y medioambientales, en las que los condicionantes biofísicas son tan importantes como los condicionantes antrópicas (Lambin et al., 2003).

El éxito del modelo dependerá del potencial de las variables elegidas para explicar la ubicación de los nuevos usos. Obviamente, las variables explicativas más apropiadas variarán en función de la categoría del tipo de cambio de uso de suelo que se quiere modelar y de la región modelada; por ejemplo, la ubicación de cultivos en secano dependerá mucho más de la precipitación media anual que la proximidad a áreas residenciales, pero esto último podría tener un poder explicativo alto en caso de modelización de expansión de viviendas unifamiliares alejadas de la ciudad véase (Schneider and Pontius, 2001). Para la presenta investigación se plantearon cuatro variables explicativas físicas y 2 variables socioeconómicas:

- La precipitación total anual que condiciona la proliferación de especies vegetativas transitorias.
- La elevación (DEM), que define la frontera agrícola.
- La distancia a cursos de agua.
- La pendiente del terreno, debido a que limita las actividades agrícolas.
- Distancia a las vías de comunicación.
- Distancia a los centros poblados.

Se consideró la distancia de vías y a las ciudades debido a que son factores que motivan y facilitan la explotación agrícola y pueden ser factores que incidan directamente en el cambio de uso o cobertura (ver figura 4.12).

4.2.2.3. Entrenamiento de la red neuronal y simulación mediante autómatas celulares

Se utiliza una RNA de perceptrón multicapa, cuyos datos de entrada son el raster de cambio de uso de suelo entre 1988-2001 y las variables explicativas previamente descritas, los pesos que se le dará a cada neurona, durante la fase

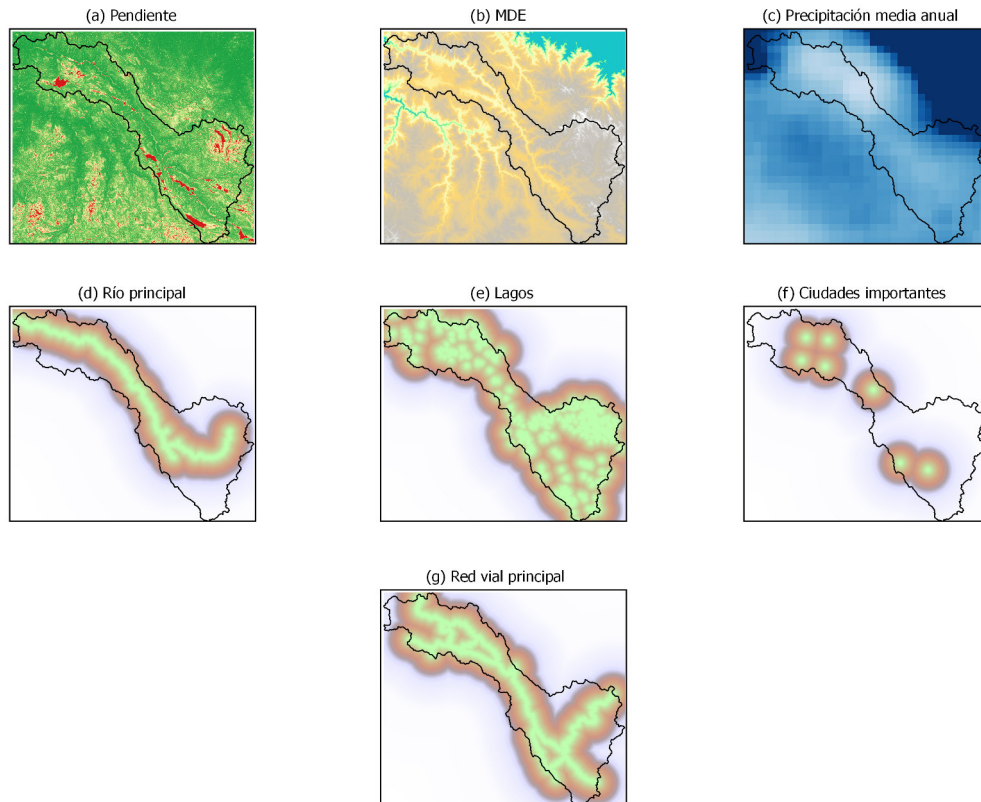


Figura 4.12: Variables Explicativas consideradas en el estudio

de entrenamiento, se calculan mediante el algoritmo back propagation (*BP*), que selecciona aleatoriamente los pesos iniciales y luego compara las salidas calculadas con los resultados esperados (transiciones observadas). La diferencia entre los valores observados y calculados es cuantificada mediante el error cuadrático medio (*RMSE*), el mismo que luego es distribuido a todos los nodos de la red, calculándose nuevamente los pesos de cada nodo. Este proceso es repetido muchas veces hasta que el error se estabiliza en su nivel más bajo (Pijanowski et al., 2002). Se utilizó una función sigmoide para definir el umbral de la RNA.

Utilizando las mismas variables explicativas y el modelo RNA ya entrenado, se puede calcular la probabilidad de que una celda cambie o persista en una de las 4 clases analizadas mediante reglas de transición impuestas por un autómata celular. Se simularon 2 escenarios uno para el año 2014 y 2030. El mapa simulado para el 2014 fue comparado con el mapa generado de la clasificación de la imagen Landsat presentándose una confiabilidad total del 70.82 %, un índice Kappa de 0.7482 y un coeficiente de correlación de 0.793, estos resultados demuestran una buena confiabilidad de los escenarios generados. El mapa simulado para el 2030 puede verse en la Figura 4.13.

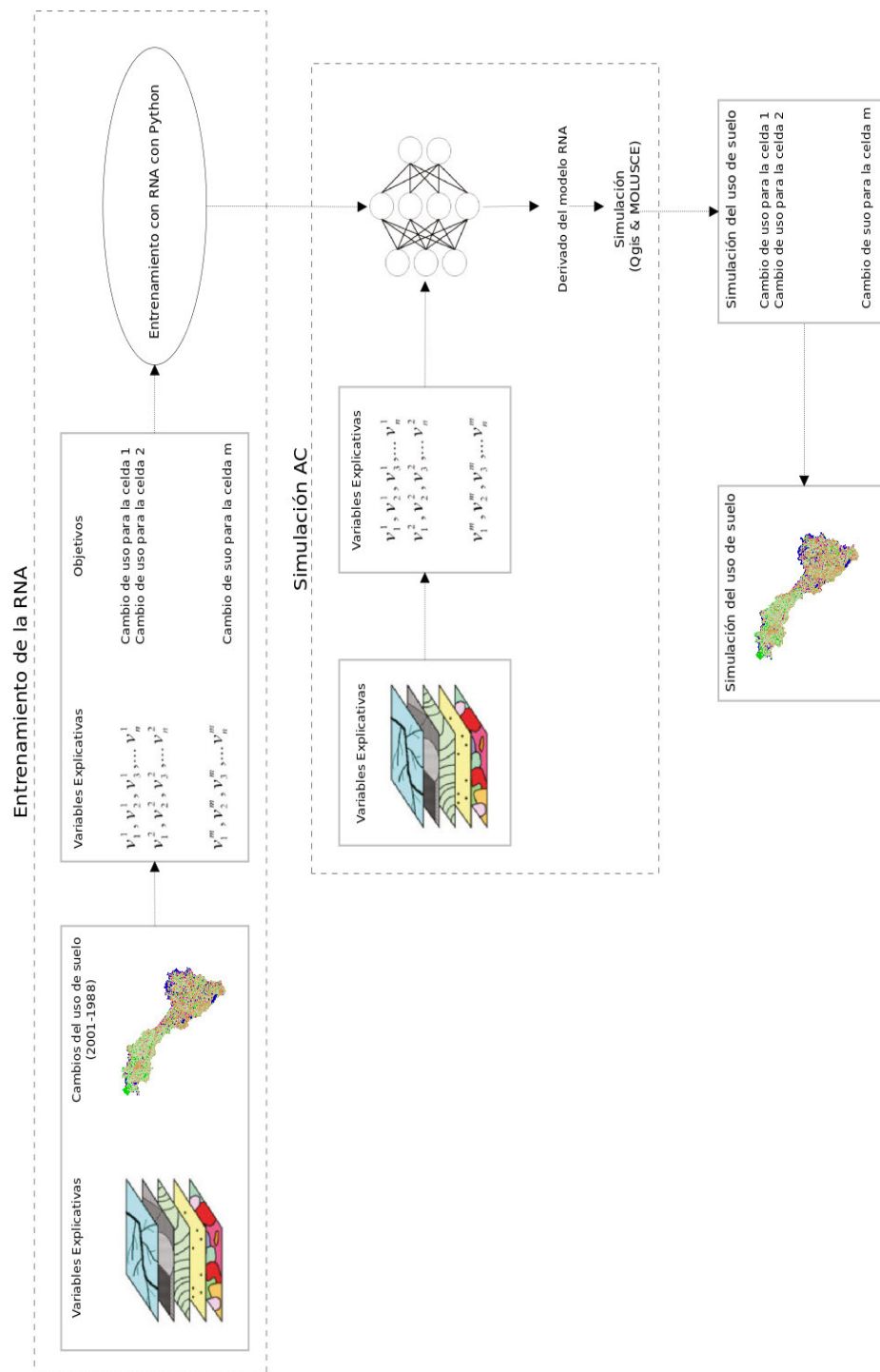


Figura 4.13: Metodología para la predicción de escenarios de uso de suelo

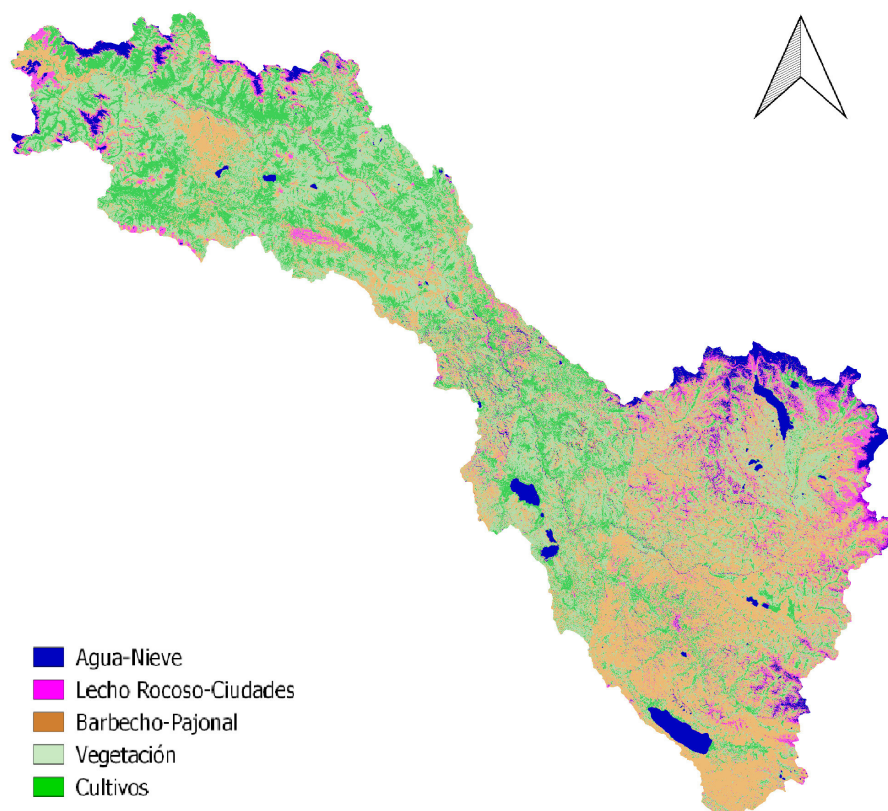


Figura 4.14: Escenario generado para el año 2030; en verde se a

Cuadro 4.7: Resumen del cambio de cambios observados 2014-2030

	2014 (km ²)	2030 (km ²)	Δ	2014 %	2030 %	Δ %
Casco Urbano- Lecho rocoso	443.05	451.82	8.77	4.602	4.693	0.091
Barbecho- Pajonal	5329.52	5210.23	-119.29	55.357	54.118	-1.239
Cultivos	2194.21	2302.79	108.58	22.791	23.919	1.128
Vegetación arbustiva	1660.82	1662.76	1.94	17.251	17.271	0.020

4.3. Implementación del modelo SWAT en la cuenca del Vilcanota

Esta sección detalla la puesta operativa del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Vilcanota. En él se describe los pasos seguidos y supuestos considerados para la simulación y la calibración mediante PSO.

Cuadro 4.8: Tabulación cruzada entre el uso de suelo para los años de 2014 y 2030

	Casco Urbano- Lecho rocoso	Barbecho- pajonal	Cultivos	Vegetación arbustiva	Total
Casco Urbano- Lecho rocoso	440.12	7.79	1.41	2.5	443.05
Barbecho- pajonal	1.63	5178.26	18.29	12.05	5329.52
Cultivos	0.76	132.37	2149.22	20.44	2194.21
Vegetación arbustiva	0.54	11.1	25.29	1625.83	1660.82
Total	443.05	5329.52	2194.21	1660.82	9627.6

4.3.1. Simulación del modelo SWAT

4.3.1.1. Descripción del modelo SWAT

Debido a la naturaleza y desarrollo del modelo, SWAT permite simular diferentes procesos físicos en la cuenca, opera típicamente en un intervalo de tiempo diario para simulaciones a largo plazo en las cuencas y representa heterogeneidades espaciales dividiendo el ámbito de estudio en varias subcuencas. El uso de subcuencas en una simulación es particularmente beneficioso cuando existen áreas con usos o tipos de suelos dominantes o diferentes a modo de incrementar la precisión en la predicción del caudal, movimiento de pesticidas, sedimentos o nutrientes, SWAT permite dividir aún más las sub-cuencas en múltiples unidades de respuesta hidrológica (Hydrologic Response Unit o HRU, por sus siglas en inglés) basado en la combinación de suelo, cubierta vegetal y pendientes.

La cantidad y calidad de agua simulada de cada subcuenca se enrutan y distribuyen al caudal de salida de la cuenca (Neitsch et al. 2005b).

Entre las ventajas del modelo SWAT podemos mencionar:

- Modelo de base física.
- Posee una comunidad de usuarios numerosa.
- Gran cantidad de documentación.
- Emplea datos de entrada relativamente fáciles de conseguir exceptuando la información de cultivos e información de cobertura.

4.3.1.2. Delimitación de la cuenca y subcuencas

La delimitación de la cuenca se realizó en función a la estación de aforo, para este proceso se utilizó información de alturas espacializada obtenida del MDE y un

raster de 0 y 1 donde 1 represente el área de la cuenca. A partir de esta información fue posible calcular la dirección de flujo mediante el algoritmo D8 (Moore, 1996), la acumulación de flujo y delimitación de las subcuencas existentes (figura 4.15).

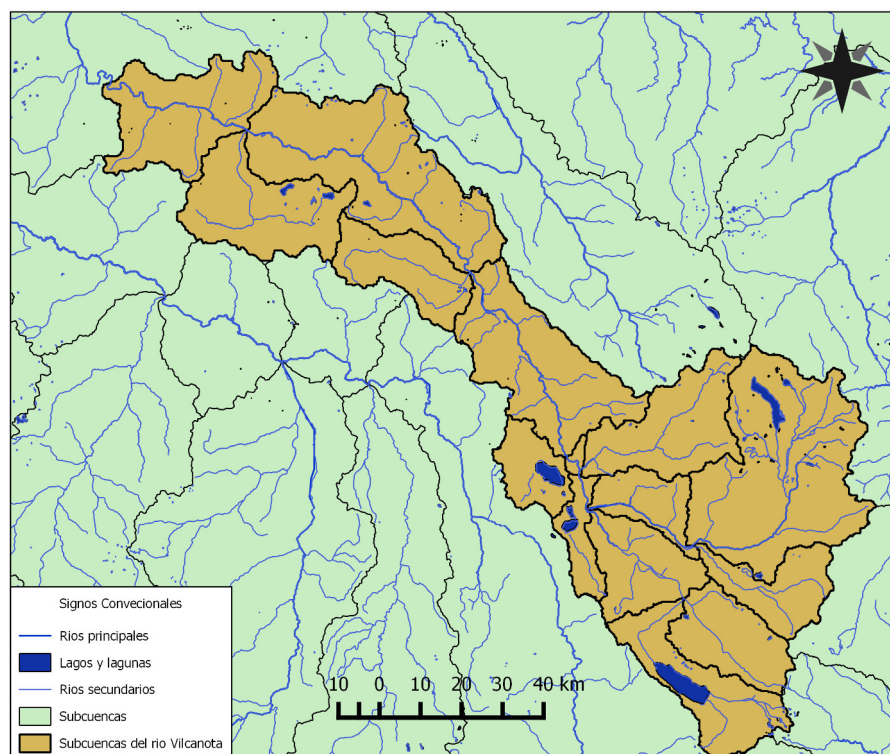


Figura 4.15: Subcuencas generadas en la zona de estudio

4.3.1.3. Definición de la Unidades de Respuesta Hidrológica

Las unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), son áreas dentro de una cuenca que presentan características geo-climáticas homogéneas y el mismo comportamiento hidrológico frente a las precipitaciones. La definición de HRUs se realiza mediante la elección de categorías temáticas relevantes en el proceso de formación de escorrentía superficial e infiltración dentro de una cuenca. Para la presente investigación las categorías escogidas fueron el uso de suelo, tipo de suelo y pendiente (la pendiente fue subclasificada en 3 clases; de 0 a 6 %, de 6 a 10 % y mayores a 10 %.), esta información es interceptada, obteniéndose así 399 HRUs (figura 4.16).

4.3.1.4. Información meteorológica

La información meteorológica es definida por la localización y cota altitudinal de las estaciones (figura 4.3), los valores registrados de precipitación media diaria y

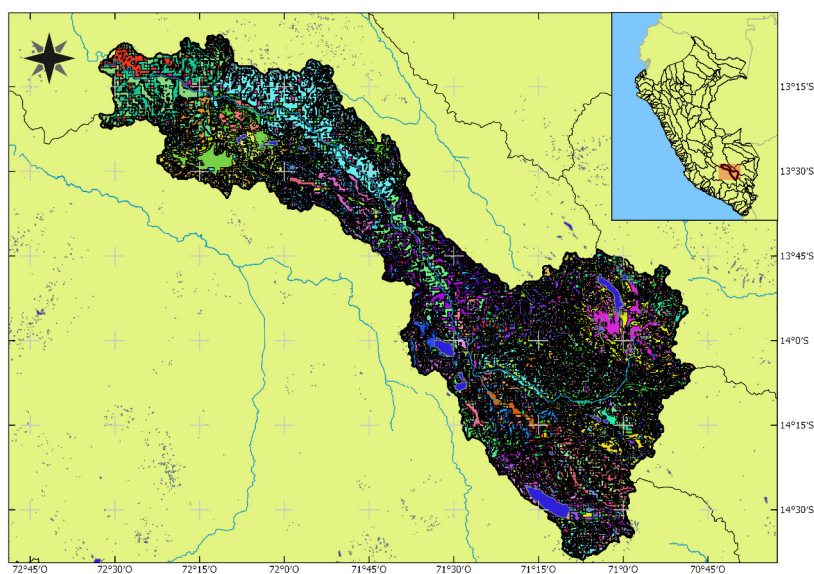


Figura 4.16: Número de HRUs generadas en la cuenca del río Vilcanota

temperaturas mínimas y máximas diarias principalmente, aunque también cabe la posibilidad de introducir valores de radiación y velocidad del viento medias diarias, sin embargo no fueron utilizadas en el estudio debido a la inexistencia de los datos.

4.3.1.5. Salidas de información

SWAT permite definir el inicio y final de la simulación. Para este estudio se analizó los periodos 2001-01-01 al 2011-01-01. Las salidas de todos los parámetros generados por el modelo hidrológico SWAT se reproducen en distintos archivos (ver tercera columna del cuadro 4.9), la información de caudal se encuentra en el archivo watout.dat. Al comparar los resultados de la simulación con la estación hidrométrica km.105 se obtuvo un Nash de -1.07 lo que evidencia la necesidad de un ajuste a sus parámetros (ver figura 4.17).

4.3.2. Calibración del Modelo Hidrológico SWAT

SWAT contiene numerosos parámetros que describen procesos en los que hidrología, calidad del agua, y el sistema suelo-planta interactúan. El Cuadro 4.3 muestra el conjunto de 22 parámetros que utiliza SWAT para las simulaciones hidrológicas.

Como primer paso es necesario un análisis de sensibilidad sobre los 22 parámetros listados en el cuadro 6.1, con el fin de tomar solo en cuenta los parámetros

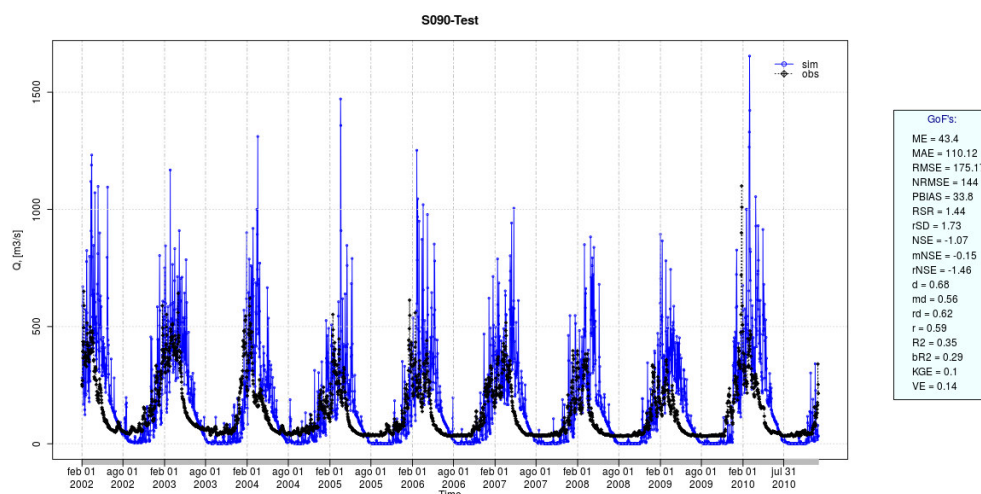


Figura 4.17: Simulación del modelo SWAT respecto a la Estación hidrométrica km. 105

Cuadro 4.9: Parámetros del modelo SWAT-2005 pertinentes para la simulación hidrológica.

Parámetros	SWAT-2005
Baseflow alpha factor [days]	ALPHA_BF *.gw
Manning's "n" value for the main channel [-]	CH_N2 *.rte
Initial SCS CN II value [-]	CN2 *.mgt
Saturated hydraulic conductivity [mm/hr]	SOL_K *.sol
Available water capacity [mm H ₂ O/mm soil]	SOL_AWC *.rte
Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium [mm/hr]	CH_K2 *.rte
Soil evaporation compensation factor [-]	ESCO *.hru
Surface runoff lag time [days]	SURLAG *.bsn
Snowfall temperature [°C]	SFTMP *.bsn
Snowmelt base temperature [°C]	SMTMP *.bsn
Minimum melt factor for snow [°C]	SMFMN *.bsn
Snowpack temperature lag factor [-]	TIMP *.bsn
Maximum melt factor for snow [°C]	SMFMX *.bsn
Manning's "n" value for overland flow [-]	OV_N *.hru
Deep aquifer percolation factor [-]	RCHRG_DP *.gw
Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	GWQMN *.gw
Groundwater "revap" coefficient [-]	GW_REVAP *.gw
Groundwater delay time [days]	GW_DELAY *.gw
Moist soil albedo	SOL_ALB *.sol
Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap" [mm]	REVAVMN *.gw
Plant uptake compensation factor [-]	EPCO *.bsn
Maximum canopy storage [mm H ₂ O]	CANMX *.hru

más relevantes en la simulación; esta tarea se realizó mediante el algoritmo Latin Hypercube One-factor-At-a-Time (LH-OAT) desarrollado por [Van Griensven et al. \(2006\)](#). LH-OAT combina el método OAT (one factor at a time) y método de muestreo LH (Latin Hypercube) tomando el muestreo de Latin Hypercube como puntos iniciales para el diseño OAT. El análisis de sensibilidad identifica los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo hidrológico con respecto a las observaciones reales. Los códigos de programación usados para realizar esta tarea pueden verse en la última parte del anexo y son una adaptación de [Rojas and Zambrano-Bigiarini, 2012](#).

Los detalles del análisis de sensibilidad aplicado a los parámetros del modelo SWAT son los siguientes:

- Se usó como indicador de ajuste de bondad la Eficiencia de Nash-Sutcliffe.
- El periodo para el análisis corresponde del 01-01-2001 hasta 31-12-2011.
- El número de estratos para el muestreo LH se define como $M = 300$, mientras que la fracción de variación fue de 10 %.

La clasificación obtenida a partir del análisis de sensibilidad se incluye en el cuadro 4.10. Nosotros consideramos los 9 primeros parámetros como sensibles.

En general, los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad tiene mucha similitud a investigaciones realizadas anteriormente ([Zambrano-Bigiarini and Rojas, 2013](#), [Holvoet et al., 2005](#), [Muleta and Nicklow, 2005](#), [Van Liew et al. 2007](#), [Van Griensven et al. 2006](#)); este subconjunto de parámetros constituyen la base para la calibración del modelo SWAT.

La calibración de un modelo se alcanza mediante la optimización de los parámetros envueltos en su estructura matemática, comparando cualitativa y cuantitativamente la respuesta del modelo con una serie de mediciones de campo u observaciones, razón por la cual se le denomina un proceso inverso ([Gupta and Sorooshian, 1985](#)).

Para el presente trabajo de investigación se utilizó el método de optimización enjambre de partículas (descrito en el capítulo 2), este se encuentra disponible en la librería *hydroPSO* ([Zambrano-Bigiarini and Rojas 2012](#)) en el lenguaje de programación R. La interacción básica entre *hydroPSO* y el modelo a calibrar se muestra en la Figura 4.18.

HydroPSO necesita básicamente definir el número de parámetros a calibrar (obtenidos previamente en el análisis de sensibilidad) y el número de partículas, este último es estimado como una función de la dimensionalidad mediante la ecuación

Cuadro 4.10: Sensibilidad calculada por el método LH-OAT

RankingNmbr	Nombre del Parámetro	Importancia Relativa
1	ALPHA_BF	5.707e+02
2	CH_N2	2.238e+02
3	CN2	1.874e+02
4	SOL_K	1.433e+02
5	SOL_AWC	1.298e+02
6	CH_K2	9.871e+01
7	ESCO	9.403e+01
8	SURLAG	6.890e+01
9	SFTMP	5.148e+01
10	SMTMP	2.286e+01
11	SMFMN	1.619e+01
12	TIMP	6.051e+00
13	SMFMX	3.736e+00
14	OV_N	2.608e+00
15	RCHRG_DP	4.296e-01
16	GWQMN	3.301e-01
17	GW_REVAP	1.705e-01
18	GW_DELAY	6.303e-02
19	SOL_ALB	1.192e-02
20	REVAVMN	4.582e-03
21	EPCO	0.000e+00
22	CANMX	0.000e+00

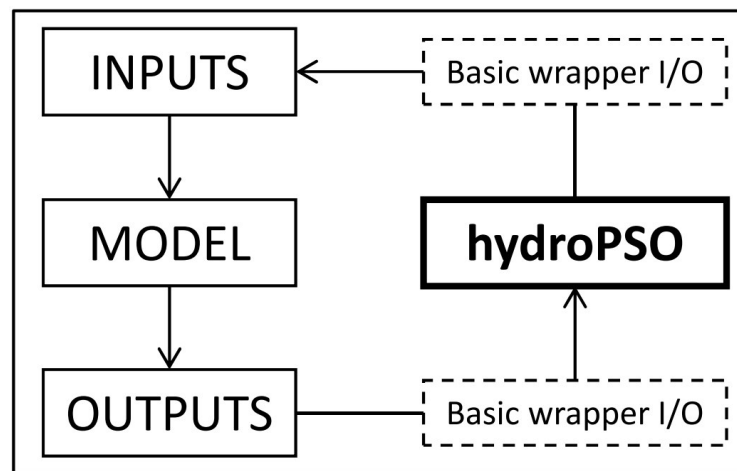


Figura 4.18: Diagrama de flujo de la aplicación e interacción entre hydroPSO y el código de modelo para ser calibrado. Fuente: [Zambrano-Bigiarini and Rojas 2012](#)

$10 + D/2$. Se consideraron 1000 iteraciones como máximo y una tolerancia relativa igual a 10^{-30} para el algoritmo. Los valores de los parámetros se normalizan al rango $[0,1]$ según lo recomendado por [El Dor et al. \(2012\)](#) cuando el espacio de búsqueda no es un hipercubo. Las posiciones de las partículas se inicializan siguiendo un enfoque

LHS (Latin Hypercube Samples), se establece un valor constante para los coeficientes c_1 y c_2 igual a 2.05 y el factor de fijación de las velocidades (λ) se define mediante una variación lineal entre [1.0, 0.5] (Zambrano-Bigiarini and Rojas 2012).

La Figura 4.19 muestra la evolución de NSE como una función del número de iteración. Vemos una fase inicial de exploración (hasta ca. iter = 40) que estabiliza después de la iteración 80 en torno a un valor de $NSE = 0,777$. Al mismo tiempo, el Radio de enjambre normalizado (normalized swarm radius o NSR, por sus siglas en inglés) indica una clara convergencia a la zona de atracción alrededor de este óptimo.

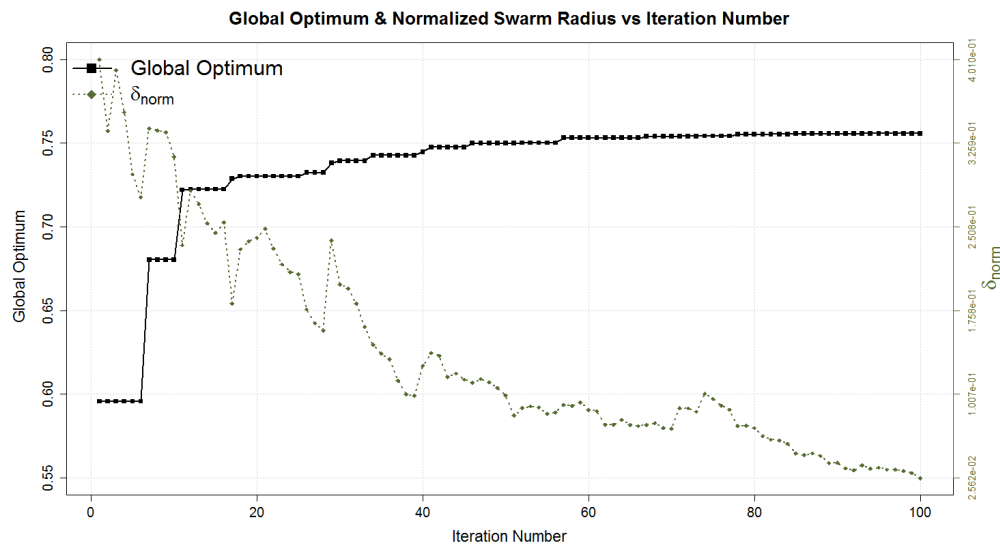


Figura 4.19: Evolución del óptimo global y el radio de enjambre normalizado frente al número de iteración

En el anexo, se puede observar información útil para evaluar rendimiento y la convergencia del NSE, parámetros y velocidades por número de iteración, además de un resumen sobre la interacción entre todos los parámetros (sensibles) listados en el Cuadro 4.10. Los resultados de caudal luego de la calibración pueden verse en la figura 4.21 y el diagrama de dispersión entre los datos observados frente a los simulados en la figura 4.20.

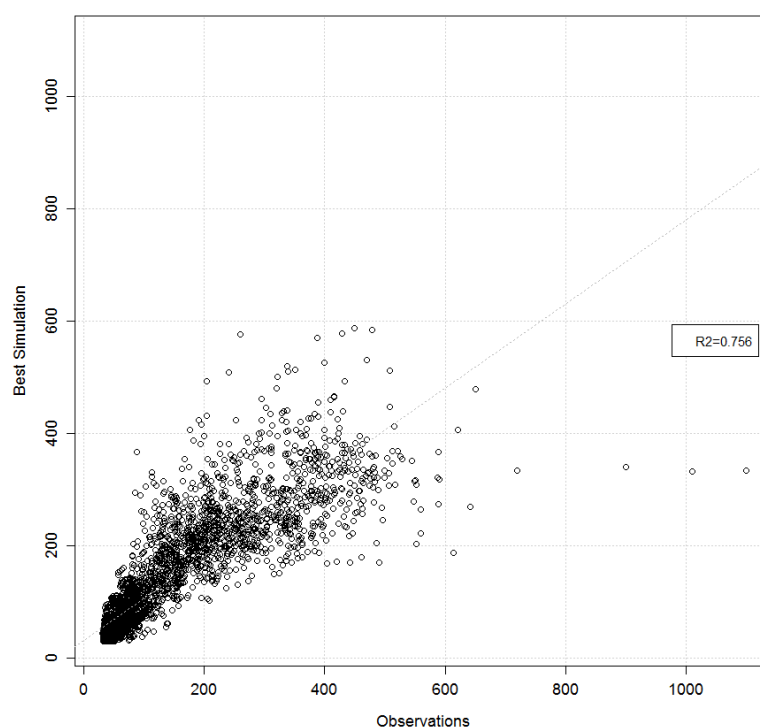


Figura 4.20: Gráfico de dispersión luego de la calibración contra descargas diarias observadas en la estación km.105

4.4. Asimilación y Aplicación al Análisis de Inundaciones

Esta sección engloba el uso de los resultados obtenidos anteriormente. Se analiza los parámetros (precipitación, humedad antecedente y cobertura del suelo) que influyen en la ocurrencia de inundaciones y son sensibles a presentar algún cambio ya sea espacial o temporal, el objetivo, es entender el comportamiento aislado de los parámetros relacionándolos con la producción de escorrentía superficial tanto promedio total, por subcuenca y considerando a su vez los días que presentaron caudales críticos.

En la primera parte de esta sección, se emplea el modelo SWAT calibrado para estudiar el efecto de los distintos escenarios de cobertura del suelo en el aumento de escorrentía y por ende mayor probabilidad de generación de inundaciones y en las secciones posteriores se plantea desde un enfoque netamente estadístico el análisis de la precipitación y la condición de humedad antecedente (CHA) bajo el mismo propósito.

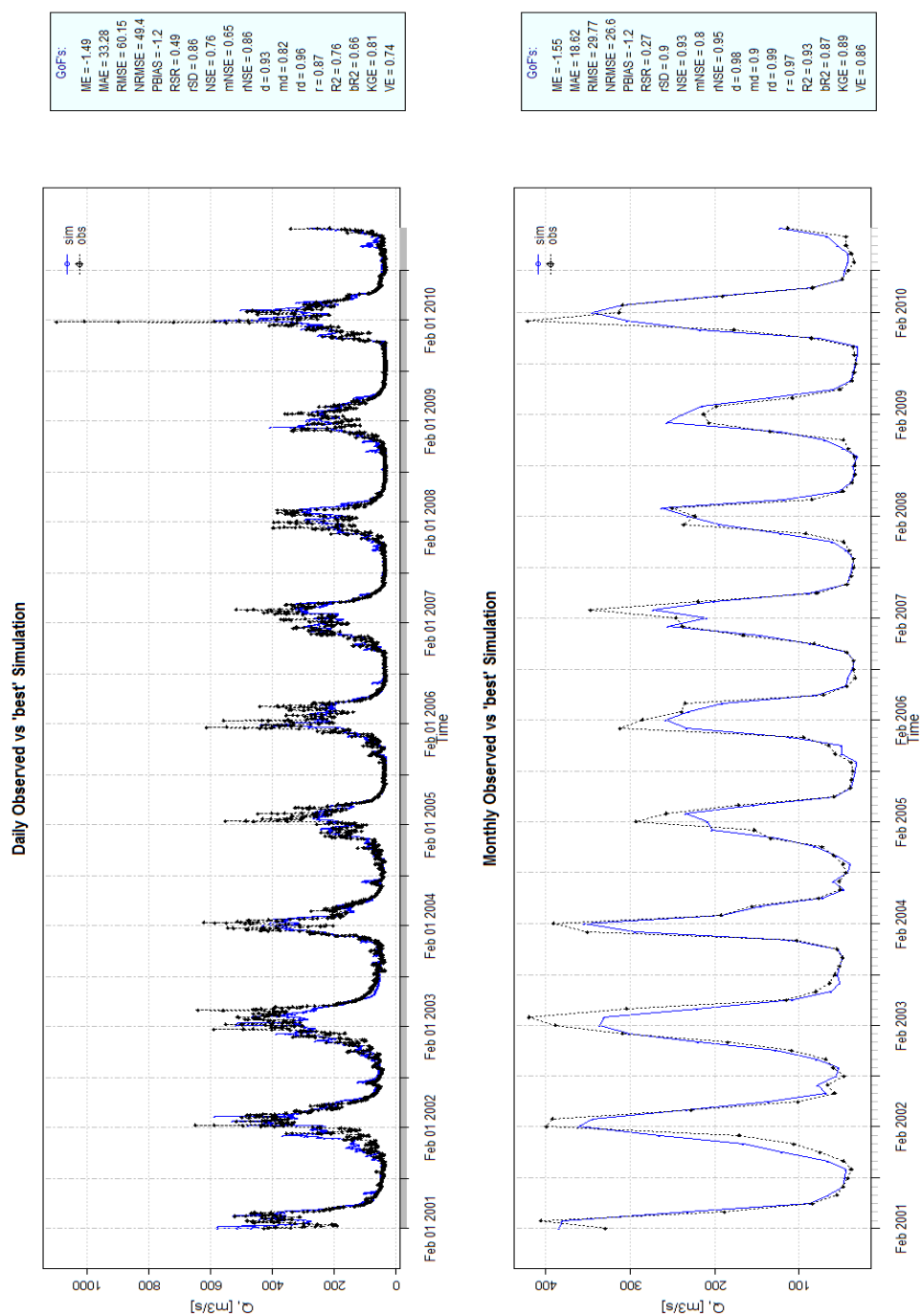


Figura 4.21: Datos de la simulación luego de la calibración frente a las descargas observadas en la estación km.105. El panel superior muestra las series temporales diarias mientras que el panel inferior considera un agrupamiento de los datos por meses. El cuadro resumen de la derecha muestra los resultados de varios indicadores de eficiencia

4.4.1. Escenarios de cobertura del suelo como condicionante a Inundaciones

La cobertura del suelo es uno de los parámetros que más ha variado en los últimos años en la cuenca del Vilcanota (cuadros 4.3 y 4.5), es por ello que surge la necesidad de evaluar si estos cambios han desencadenado una mayor cantidad de escorrentía neta en la cuenca.

Se implementa los escenarios de cobertura de suelo para los años 1988, 2014 y 2030 (ver capítulo 4 sección 1) en el modelo hidrológico SWAT, considerando como datos meteorológicos de entrada los datos originales con los que se calibró el modelo, cabe resaltar que estos datos se mantienen invariantes para cada escenario de suelo a analizar. El propósito es generar las series de tiempo de escorrentía generadas para cada HRU y para los distintos escenarios de cobertura del suelo de los años mencionados.

El análisis de la producción de escorrentía se realiza bajo el planteamiento de dos condicionantes que serán utilizadas a lo largo de todo el capítulo, la primera, considera el análisis de toda la serie de tiempo de escorrentía y la segunda, solo considera los días en los que ocurrió un caudal por encima del percentil 97.5 (figura 4.22), esto a causa de que dichos caudales están fuertemente correlacionados con las inundaciones registradas y con altas tasas de producción de escorrentía focalizada, debido, a como se planteó a inicios de la presente tesis a que la formación de inundaciones en la cuenca del Vilcanota y en general en todas las cuencas de montaña son causadas por lluvias intensas y desbordamientos del lecho del río (Raissig et al., 2010; Huggel et al., 2014)

Analizar las series de tiempo de escorrentía para cada HRU sería una tarea abrumadora y sesgada por alta la variabilidad de la precipitación a paso diario, es por ello que se plantea para su análisis el promedio espacial considerando las 15 subcuencas establecidas en la primera fase de la modelización hidrológica (ver figura 6.2). Los resultados de la producción de escorrentía por subcuenca para las dos condicionantes planteadas puede observarse en la figura 4.23.

Observamos que el cambio de cobertura en la cuenca ha propiciado una mayor generación en la cantidad de escorrentía superficial, si comparamos la producción de escorrentía para los mapas de cobertura de suelo entre 1988 y 2014 notamos que ha aumentado $20.70 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que al comparar con el escenario de cobertura del suelo para el año 2030 observamos un aumento de $22.70 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio. Al analizar la producción de escorrentía considerando solo los días en los que se presenció un caudal crítico (caudal por encima del percentil 97.5), notamos que la

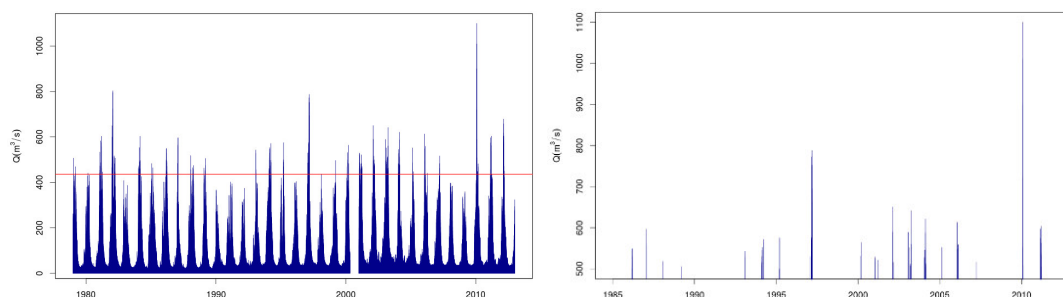


Figura 4.22: Serie de Tiempo de caudales en la estación km.105. A la derecha se observa toda la serie de tiempo, la línea en rojo representa el percentil 97.5, a la izquierda observamos solo los caudales que pasaron el percentil 97.5.

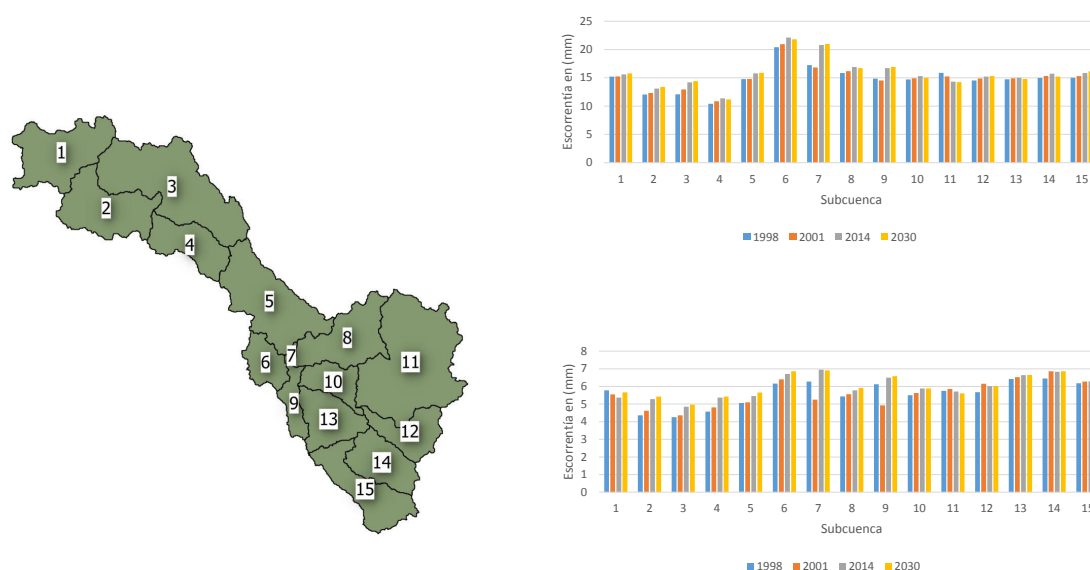


Figura 4.23: Promedio de escorrentía por sub cuencas para distintas cobertura de suelo. El histograma inferior muestra el promedio de escorrentía considerando toda la serie de tiempo; el histograma superior muestra el promedio considerando solo los percentiles 97.5

producción de escorrentía aumenta en $76.94 \text{ m}^3/\text{s}$ para los mapas de cobertura entre 1988-2014 y comparando con el escenario de cobertura de suelo para el año 2030 se generaría un $79.22 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio. Las subcuencas en donde se presenció un aumento por encima de 0.5 mm de escorrentía puede apreciarse en rojo en la figura 4.24, mientras que las cuencas en blanco representa cambios no significativos por debajo de 0.5 mm .

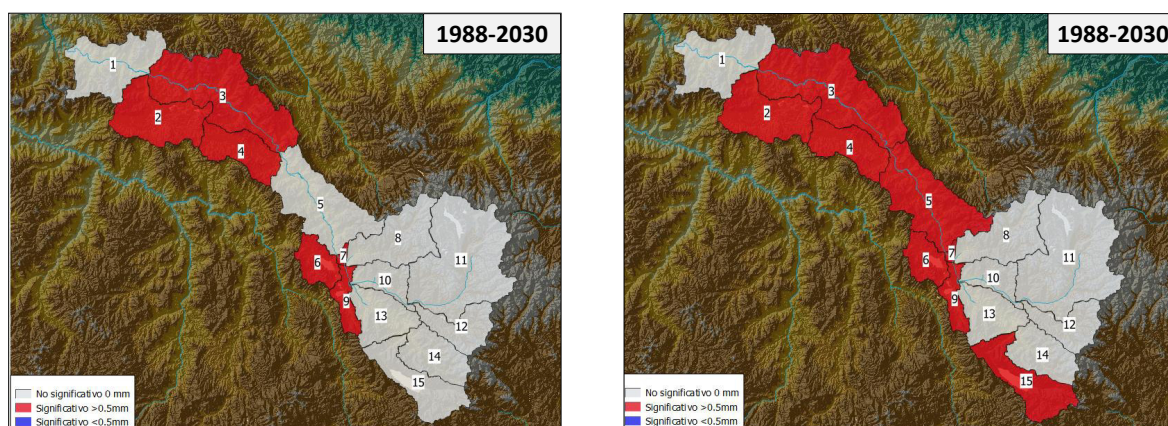


Figura 4.24: Promedio de escorrentía por sub cuencas para distintas cobertura de suelo. El histograma superior muestra el promedio de escorrentía considerando toda la serie de tiempo; el histograma inferior muestra el promedio considerando solo los percentiles 97.5

4.4.2. La precipitación efectiva como condicionante a inundaciones

Se ha encontrado en la cuenca que la relación precipitación-caudal no es en absoluto constante, pues la escorrentía presenta gran variabilidad para todos los años estudiados.

Se calcula primero la precipitación efectiva en la cuenca, es decir, la precipitación menos la evapotranspiración e intercepción del follaje (parámetros que fueron estimados a través del modelo hidrológico SWAT), con el fin de obtener la precipitación neta que llega al suelo. Al relacionar la precipitación efectiva máxima y promedio presente en la cuenca con los caudales críticos notamos que son excluyentes, es decir, que si se presenta un evento de precipitación intensa esta no se verá necesariamente reflejado en un aumento de caudal (ver figura 4.25).

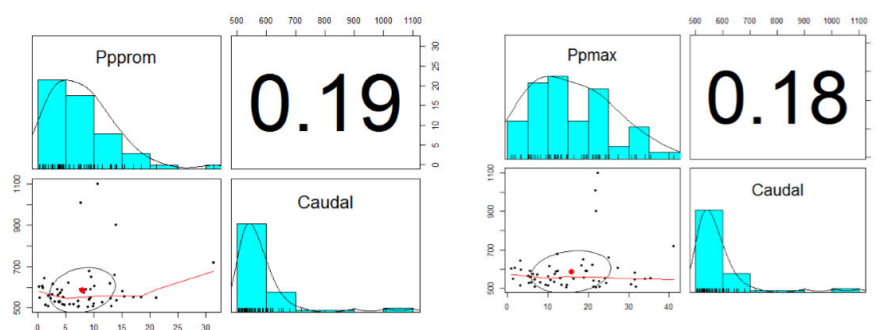


Figura 4.25: Correlación entre la precipitación máxima efectiva y promedio vs los caudales por encima del percentil 97.5.

4.4.3. Condición de Humedad Antecedente (CHA) como condicionante a inundaciones

La estimación de la humedad del suelo es un proceso complejo cuya estimación aun en la actualidad no es del todo precisa debido a los componentes involucrados y a los procesos físicos que ocurren en medios no saturados. En esta investigación se plantea el uso de indicadores basados en la precipitación antecedente (ver cuadro 4.11) debido a su practicidad y a que reflejan buenos resultados al correlacionarse con el contenido de humedad del suelo (Wu et al., 2015 Froidevaux et al., 2015). El API (Antecedent Precipitation Index por sus siglas en ingles), uno de los indicadores planteados para esta investigación es definido como (Linsley and Kohler 1951):

$$IAP = \sum_{-i}^{t=-1} P_t k^{-t} \quad (4.6)$$

Donde i es el número de días considerados, k es una constante de decaimiento y P_t es la lluvia durante el día. El valor de i representa el número de días y el valor de k oscila entre 0,80 y 0,98 ($k= 0.85$ es considerado para este estudio) (Viessman Jr and Lewis 1996).

Cuadro 4.11: Cuadro resumen de los índices de CMA utilizados en esta investigación

Indicador de la Condición de Humedad Antecedente (CHA)	Descripción
Acum-13	Acumulación de la precipitación efectiva de 3 a 1 día antes del evento.
Acum-15	Acumulación de la precipitación efectiva 5 a 1 día antes del evento.
Acum-52	Acumulación de la precipitación efectiva 5 a 2 días antes del evento.
Acum-53	Acumulación de la precipitación efectiva 5 a 3 días antes del evento.
API-3	Índice de precipitación antecedente (API) considerando 3 días.
API-4	Índice de precipitación antecedente (API) considerando 4 días.
API-5	Índice de precipitación antecedente (API) considerando 5 días.

Se estudia la CHA solo para los días de ocurrencia de caudales superiores al percentil 97.5, todos los índices son calculados en base a la máxima precipitación

efectiva observada en el día en la cuenca, además, se ha considerado el desfase producto de la demora en la respuesta hidrológica (tiempo de concentración) estableciéndose 2 áreas, una área en la que el tiempo de concentración es inferior a 24 h (en gris) y la segunda área en donde el tiempo de concentración es superior a 24 h e inferior a 48 h (en verde), no se encontraron áreas en la cuenca en donde el tiempo de concentración exceda las 48 h (figura 4.26).

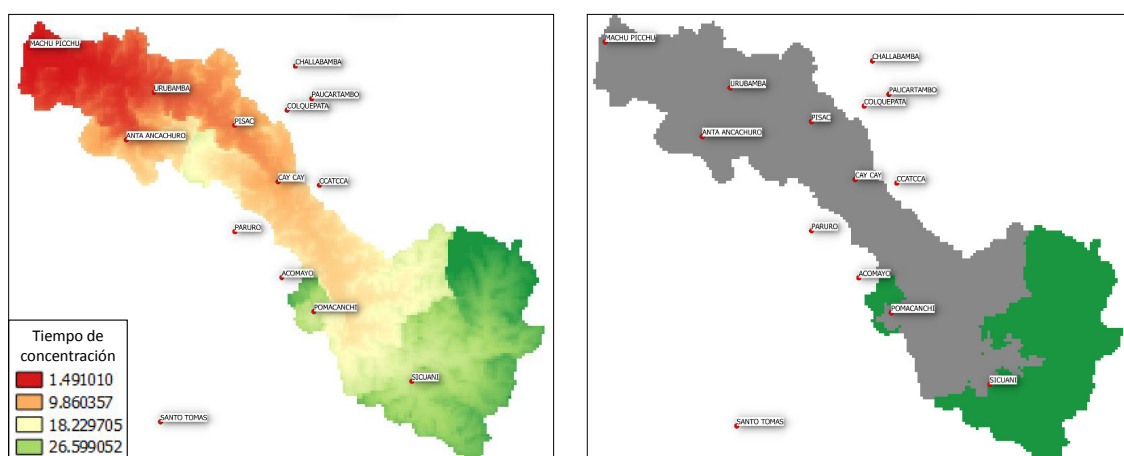


Figura 4.26: Tiempo de concentración de la cuenca (imagen izquierda) a la derecha observamos el tiempo de concentración clasificado cada 24 h., lo gris nos indica un tiempo de concentración menor a 24 h y el área en verde un tiempo mayor a 24h pero menor a 48h.

La correlación entre los índices y el caudal puede verse en la figura 4.26, observamos que el índice API5 y API4 presentan las mejores correlaciones frente a los caudales críticos, en donde se observa un comportamiento exponencial de los datos, no obstante, el indicador Accum53 también presenta resultados alentadores e interesante, especialmente para actividades de monitoreo y pronóstico ya que este indicador puede obtenerse hasta dos días antes de ocurrido un caudal potencial de inundaciones.

Al ser la cuenca demasiado extensa, es preferible analizar la relación entre CHA y los caudales críticos en áreas de menor extensión, esto se realiza con el objetivo de determinar zonas más sensibles a detectar las inundaciones. Es así, que subdividimos la cuenca en 4 partes basado en la distancia a la estación km. 105 y la elevación mediante la técnica de agrupamiento k-means (ver figura 4.27). Una vez realizado ello, se calcula la precipitación efectiva máxima areal de cada cluster considerando

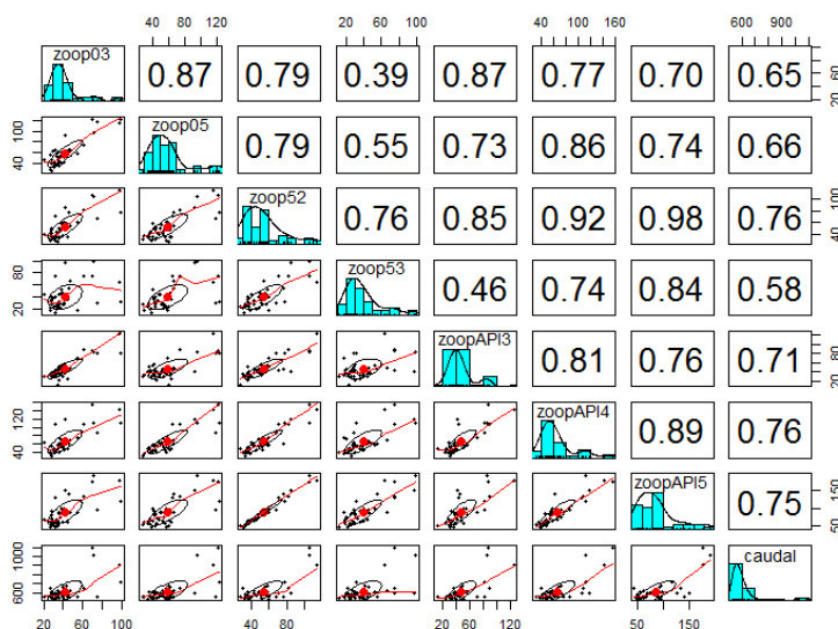


Figura 4.27: Correlación entre los índices y el caudal por encima del percentil 97.5 en la estación km.105. La distribución de los datos se muestra en la diagonal, en la parte inferior a la diagonal se muestra los gráficos de dispersión de dos variables con una línea de ajuste y en la parte superior el valor de la correlación.

solo las estaciones que se encuentran en la cuenca, esta precipitación es utilizada para calcular nuevamente los índices de CHA, los resultados pueden verse en el cuadro 4.11, aquí se observa que el cluster 2 ubicado en la parte baja de la cuenca es el cluster más sensible a detectar posibles inundaciones.

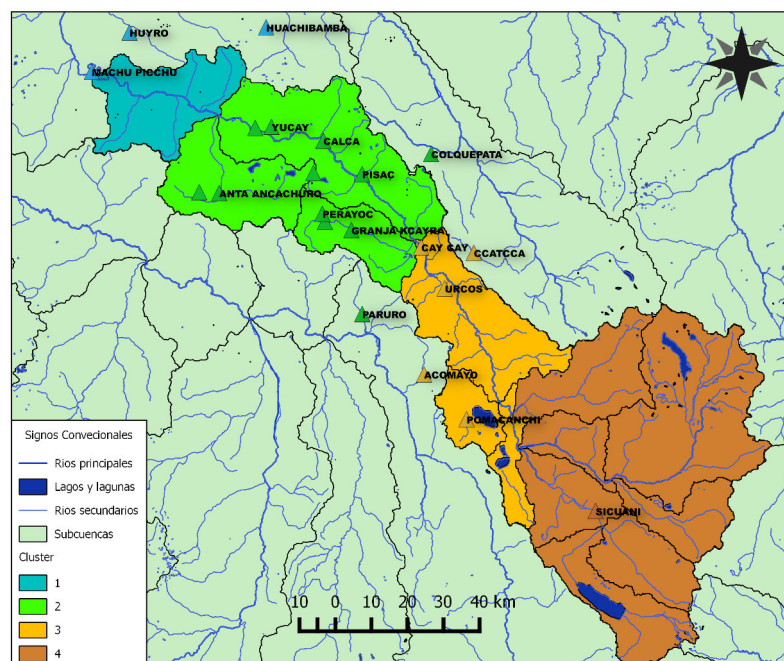


Figura 4.28: Cluster generados para el análisis de la CHA.

Cuadro 4.12: Coeficiente de correlación entre los índices de CHA y los caudales por encima del percentil 97.5

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Acum-13	0.30	0.71	0.47	0.25
Acum-15	0.34	0.70	0.54	0.15
Acum-52	0.27	0.79	0.63	-0.03
Acum-53	0.05	0.53	0.56	-0.19
API-3	0.36	0.80	0.48	0.12
API-4	0.35	0.84	0.58	0.02
API-5	0.22	0.75	0.65	-0.09

Capítulo 5

Discusión de Resultados

Este capítulo se centra en la valoración analítica de los resultados encontrados en los capítulo anterior. El propósito fundamental es la discusión y comparación con investigaciones apriorísticas semejantes tomando en cuenta el contexto geográfico, los datos utilizados y la metodología. Además, se plantea los alcances y la fiabilidad de los resultados obtenidos así como las cuestiones que han quedado sin resolver.

5.1. Construcción de la base de datos utilizada

Generar la base de datos es el punto inicial para cualquier actividad ligada al modelamiento hidrológico y caracterización de clases de cobertura. Los datos deben asemejarse lo más cercano a las condiciones reales del terreno para así poder obtener resultados satisfactorios. Sin embargo, esta tarea acarrea grandes costos por lo que la priorización de los supuestos a resolver y la escala deben ser tomados muy en cuenta a la hora de escoger los métodos de obtención de datos.

En lo que concierne a la información necesaria para el modelamiento hidrológico debemos considerar que la investigación se centra solo en entender el funcionamiento sistémico de la escorrentía, así que podemos brindar menor atención a la confiabilidad de los demás procesos hidrológico que se dan lugar en la cuenca. Es así que motivados por la fácil obtención, mediciones continuas y captura de la espacialización a grandes rasgos planteamos el uso de información obtenida a través de sensoramiento remoto para estimar la elevación, uso de suelo y tipo de suelo, si bien también es posible estimar la variabilidad de la precipitación mediante sistemas satelitales la precisión no es adecuada aún más considerando pasos de tiempo diario ([Ramos Fernandez, 2013](#); [Tang et al., 2016](#)), por lo que se optó en este caso, por el uso de la red de monitoreo de estaciones meteorológicas del SENAMHI.

Se comprobó que la información de elevación que nos proporciona el MDE SRTM fue más que suficiente para poder delimitar correctamente la cuenca y establecer eficiente las URH. Las imágenes satelitales Landsat también nos permitieron identificar y establecer satisfactoriamente las macro-clases de cobertura presentes en la cuenca, sin embargo la información de tipo de suelo, punto crucial dentro del modelamiento hidrológico físico (ya que de este depende principalmente las tasas de infiltración y recarga de sistema subterráneos) obtenida de la base de datos worldsoil1km presenta grandes subjetividades debido principalmente el poco trabajo realizado en el Perú (ver figura 8.1), es por ello que se debe tener presente que la información obtenida no es aplicable para estudios detallados. La adecuación de los datos de cobertura del suelo y tipo de suelo al formato SWAT no tuvo mayores inconvenientes debido a la generalidad de las clases definidas.

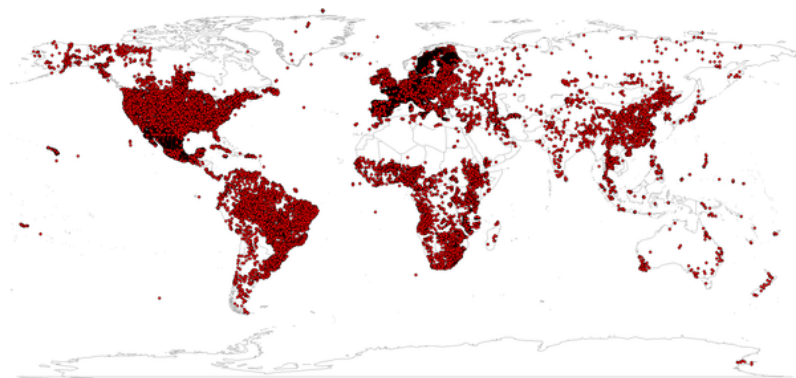


Figura 5.1: Información in situ tomada para la realización de soilgrid1km

5.2. Caracterización de la cobertura del suelo

A partir de las imágenes Landsat y por medio de la metodología explicada, queda demostrado de que existen cambios considerables en la cuenca del Vilcanota principalmente los ligados a la expansión urbana y desarrollo agrícola, además, se evidencian una importante y constante pérdida de superficie de coberturas naturales, tanto de vegetación densa como dispersa y un notable aumento de superficies de espacios abiertos. Si bien, la clase pajonal-barbecho presenta una persistencia indiscutible para todos los periodos de análisis, las clases cultivos y casco urbano-lecho rocoso constituyen un punto de análisis interesante, debido a la presencia de una tendencia a aumentar ligera de 50 y 282 km^2 para el periodo 1988-2001 y de 187 y 290 km^2 para el periodo 2001-2014 respectivamente, confirmándose así un notable aumento en la tasa de cambios, estos ocurren primordialmente en casi toda la cuenca baja y en áreas cercanas a los lagos Langui, Pomacanchi, Huaypo y Puray siendo

estos 2 últimos cercanos a la ciudad de Cusco, el aumento en la tasa de cambio para los últimos años puede ser además explicado, por la mayor actividad comercial y creación de nuevos corredores económicos en el ámbito de estudio que impulsan la expansión agrícola.

Con respecto al escenario de cobertura de suelo para el año 2030 se ha observado que la lista de las variables explicativas utilizadas para explicar las transiciones observadas ocurridas en nuestro ámbito de estudio no son óptimas, esto lo podemos comprobar al analizar el coeficiente V de Cramer (ver tabla 8.1).

La variables que presenta mayor poder explicativo es la elevación y la distancia a las ciudades, esto ratifica lo planteado a que el crecimiento del área agrícola es mermado por la elevación y que la distancia a las ciudades condicionan el crecimiento de sistemas con dependencia antrópica debido principalmente a la creación de nuevos mercados. Las demás variables explicativas no presentaron un buen grado de asociación, esto a causa de la complejidad de las transiciones espaciales en la cuenca y la poca cantidad de variables explicativas utilizadas, [Pijanowski et al. \(2002\)](#) recomienda el uso de 15 variables para estudios de mayor detalle y solo 6 para estudios exploratorios. El escenario de cobertura de suelo para el año 2030 debe tratarse como un caso hipotético que ocurrirá si se siguen manteniendo los mismos patrones de cambio.

Finalmente, la tasa de cambio para las clases cultivos y casco urbano-lecho rocoso para los años de 2014-2030 se ha reducido considerablemente (ver cuadro 5.5), debido a poca cantidad de espacio potencialmente agrícola que existe en la actualidad, al analizar los mapas de cobertura para estos años notamos que la persistencia es preeminente.

Cuadro 5.1: Coeficiente V de Cramer para las principales variables explicativas

	Casco urbano- Lecho rocoso	Barbecho- pajonal	Cultivos	Vegetación arbustiva
MDE	0.054	0.321	0.492	0
Pendiente	0.315	0.077	0.209	0.122
Precipitación media anual	0	0	0.216	0.271
Dist. río principal	0.174	0	0.105	0
Dist. lagos	0	0.233	0.426	0.157
Dist. ciudades principales	0.586	0.372	0.102	0
Dist. a la red vial principal	0.101	0.031	0.311	0

5.3. Implementación del Modelo Hidrológico SWAT

Para analizar la eficiencia del ajuste entre el caudal observado y el caudal simulado para el periodo reseñado en el capítulo 4 sección 3 se utilizaron distintos indicadores de bondad de ajuste. Como se muestra en la figura 4.17, el flujo simulado fue capaz, incluso antes de la calibración, de representar la estacionariedad de la serie de caudales observados con un pequeño desfase, es por ello que al analizar el coeficiente de correlación de pearson r , estimador que nos indica la dependencia lineal entre las variables, presenta valores satisfactorios ($r = 0,59$), no obstante, la estimación de los caudales máximos no estaba correctamente representada, esto se puede ver claramente al analizar el sesgo (P_{bias}) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe o NSE (ver ecuaciones 8.1 y 8.2) que estiman la tendencia media de los datos simulados para ser mayor o menor que sus contrapartes observados, se obtuvieron valores de 33.8 y -1.07 respectivamente, lo que comprueba lo descrito.

$$P_{bias} = \left[\frac{\sum (Q_i^{obs} - Q_i^{sim}) * 100}{\sum Q_i^{Obs}} \right] \quad (5.1)$$

$$NSE = \left[\frac{\sum (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum (Q_i^{obs} - Q_{mean})^2} \right] \quad (5.2)$$

Con respecto al análisis de sensibilidad, el análisis LT-OAT nos muestra cierta robustez del modelo hidrológico SWAT, es decir, que los valores finales del caudal son producto de la interacción de distintos parámetros y no dependen de uno solo, es así que se pueden seleccionar eficientemente los parámetros más susceptibles a representar algún cambio significativo en la generación de los caudales simulados (ver cuadro 6.2), otro aspecto que demuestra el buen desempeño en la selección de los parámetros a calibrar se muestra en la figura 4.19, en donde apreciamos una rápida estabilización del óptimo global y el radio de enjambre normalizado (normalized swarm radius o NSR, por sus siglas en inglés).

La calibración del modelo SWAT mediante PSO de los parámetros previamente seleccionados en la etapa de análisis de sensibilidad presento en general resultados muy satisfactorio, la eficiencia de Nash-Sutcliffe aumenta a 0.76 a paso diario y 0.93 a paso mensual, el éxito de los resultados puede ser comprobado también al observar el diagrama de dispersión entre los datos observados frente a los simulados en donde se obtuvo un R^2 de 0.756. La eficiencia Kling-Gupta (KGE) [Gupta et al. 2009](#) también se utilizó para eludir la limitación de las diferencias al cuadrado de la eficiencia

de Nash-Sutcliffe . Los valores KGE también indicaron un buen rendimiento de la calibración con un 81 % y 89 % a paso diario y mensual, respectivamente. Aunque los patrones de flujo simulados acertaron al flujo observado, también se analizaron los volúmenes de descarga. La eficiencia volumétrica (VE), descrita por [Criss and Winston 2008](#), fue utilizada para evaluar la temporización del flujo, es decir, evaluar la cantidad de agua fue entregada en el momento adecuado obtuvo valores de 74 % y 86 % a paso diario y mensual, con lo que se confirmó lo indicado en un inicio.

Si bien la calibración mediante PSO nos permitió obtener los valores adecuados para los parámetros analizados, también fue posible analizar el comportamiento de los parámetros independientemente y la distribución de todas las interacciones, evidenciándose una forma irregular y sesgadas que muestra una gran incertidumbre en la estimación de su valor óptimo más probable, sin embargo, debido a que priorizó una mayor cantidad de iteraciones en la etapa de exploración del algoritmo, el pico de la distribución posterior es fuerte alrededor del mejor valor encontrado de todos los parámetros analizados (Figura 5 y 6 en el apéndice D).

5.4. Asimilación y aplicación al análisis de inundaciones

Se evidencia un claro aumento de la generación de la escorrentía debido a cambios en la cobertura del suelo que si bien a escala de toda y considerando el promedio puede ser relegado ($22.70 \text{ m}^3/\text{s}$), cuando analizamos los días en donde ocurrieron caudales por encima del percentil 97.5 observamos que la cantidad de agua generada ya no es nada despreciable ($76.94 \text{ m}^3/\text{s}$).

Si analizamos la producción de escorrentía por subcuencas (ver figuras 4.23 y 4.24) observamos cambios significativos principalmente cuando consideramos los días críticos en los que el caudal presentó valores desencadenante de inundaciones, estos cambios se evidencian en la cuenca baja y en las zonas cercanas a grandes cuerpos de agua, áreas que se ha visto afectadas más afectadas por el desarrollo y expansión agrícola.

Con respecto a la precipitación efectiva, si bien se esperaba una mayor correlación con los valores de caudal observados en la estación km 105, se encontraron correlaciones inferiores a 0.20 tanto para la precipitación máxima y promedio percibida en los pluviómetros de la cuenca, esto confirma la no linealidad y complejidad del ciclo hidrológico en cuencas de montaña en donde la escorrentía formada por exceso de infiltración (ver figura 2.2) no es predominante, quedando demostrado que el monitoreo y análisis de peligros naturales como las inundaciones

no pueden estar basados netamente en ecuaciones basadas en intensidad de precipitación.

El planteamiento de la CHA basados en la precipitación efectiva antecedente (descrito en el capítulo 4 sección 4) presento altas correlaciones con los caudales, esto ya ha sido documentado anteriormente en distintas investigaciones (Fedora and Beschta, 1989; Boluwade and Rasmussen, 2015; Mengistu et al., 2016), los resultados muestran un predominio de la formación de escorrentía por exceso de saturación en la cuenca, siendo los cluster 2 y 3 las área más sensible a detectar los caudales potenciales de inundaciones, estas áreas son ,además, las áreas que producen la mayor producción de escorrentía (ver figura 4.23) y que mayores cambios de cobertura ha tenido, por lo que es muy probable que existe una correlación entre los indicadores de CHA y los cambios de cobertura, no obstante, debido a que el análisis hidrológico solo se realizó para el periodo 2001-2011 no es posible determinar dicha correlación, además de que escapa de los propositivos de la investigación

Se espera que en los próximos años se produzcan un mayor número de reportes de desastre por inundaciones sino cambian las tendencias de cambio de uso de suelo en la cuenca del Vilcanota y si se sigue presentando la misma variabilidad de la intensidad de precipitación que desde 1980 presenta una tendencia a aumentar de 20 mm (ver Figura 8.2).

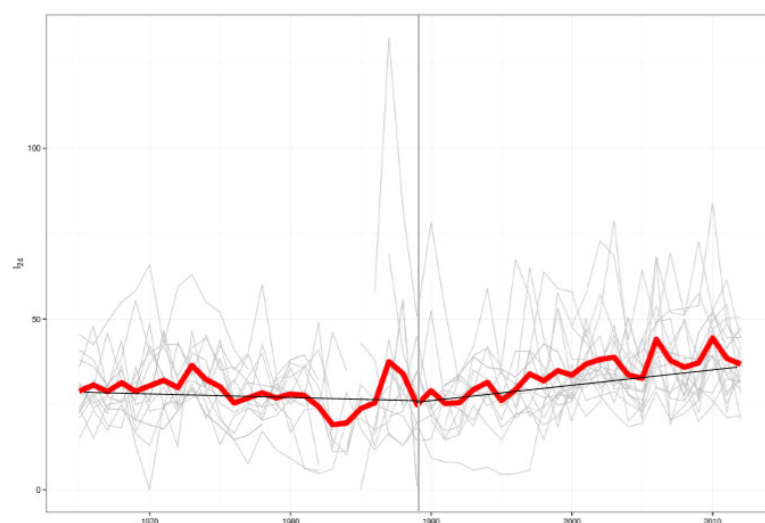


Figura 5.2: Intensidad de precipitación diaria para todas las estaciones, la linea plomas representan la serie de cada estación y la linea roja el promedio

Capítulo 6

Conclusiones

La cuenca del Vilcanota es una de las cuencas de montaña del Perú más sensible a la ocurrencia de inundaciones y riadas en la época húmeda, a través de esta investigación se ha podido caracterizar la variabilidad de la escorrentía y de los factores que la conforman, se comprobó que la escorrentía es originada principalmente por procesos de exceso de saturación del suelo y no por excesos de infiltración. Además se determinó que los cambios de cobertura ocurridos, si bien han propiciado una mayor producción de escorrentía superficial esta no es determinante en la ocurrencia de inundaciones, no obstante, se demostró que el factor más importante para el desencadenamiento de dichos fenómenos es el estado hídrico previo (precipitación antecedente) que presentase, siendo la cuenca baja el área más sensible a detectar estos fenómenos.

A continuación se plantean las conclusiones de los cuatro objetivos específicos, que permitieron llegar a la conclusión general antes descrita.

Objetivo Específico 1: Analizar la viabilidad de bases de datos basadas en sensoramiento remoto para modelamiento hidrológico y mapas de cobertura del suelo.

Se comprobó que los datos provenientes de sensoramiento remoto posibilita la realización de estudios de caracterización a escala regional de manera adecuada, presentándose mayor precisión para definir las clases de cobertura y las elevaciones. Con respecto a la caracterización del tipo del suelo y variables meteorológicas es necesario el acoplamiento con datos *in situ* para evitar en lo posible las subjetividades.

Objetivo Específico 2: Cuantificar el cambio de cobertura del suelo.

La estimación del cambio de cobertura para los años 1988, 2001, 2014 y el escenario proyectado hacia el año horizonte 2030, reveló que en líneas generales la persistencia es el estado predominante en todo el ámbito de estudio, no obstante se han producido cambios significativos en áreas cercanas a la ciudad de Cusco y a cuerpos de aguas de considerables extensiones, debido principalmente a la expansión agrícola y desarrollo urbano que se ha aseverado en los últimos años.

Objetivo Específico 3: Modelar la cuenca del Vilcanota mediante el modelo hidrológico SWAT.

El modelo hidrológico SWAT fue capaz de reproducir el registro histórico de caudales luego de la calibración de los parámetros identificados como los más sensibles a generar cambios significativos. Se presentaron ciertas limitaciones en el cálculo de los caudales en la época húmeda debido a las limitaciones de la red de estaciones meteorológicas que impiden entender completamente la espacialización de las precipitaciones, sin embargo un valor de la eficiencia de Nash- Sutcliffe de 0.76 a paso diario y 0.93 a paso mensual comprueban un buen rendimiento en líneas generales.

Objetivo Específico 4: Plantear indicadores que permitan predecir la ocurrencia e intensidad de inundaciones.

Se observó que los indicadores basados en la precipitación antecedente presentaron altas correlaciones con la ocurrencia de caudales críticos, principalmente al utilizar el indicador API-4, además, se pudo determinar que el área más sensible ha detectar posibles inundaciones es la cuenca baja. En la presente investigación quedo constatado que la activación de inundaciones depende más del estado hídrico previo que de la intensidad de precipitación como tal, siendo necesario en muchos casos solo una lluvia de pocos milímetros para desencadenar una inundación.

Capítulo 7

Recomendaciones

Concluido el presente trabajo de investigación, se considera necesario plasmar las temáticas que se omitieron, las nuevas líneas de investigación que se crean y las cuestiones que ayudarían a tener un poco más claro los procesos de activación de inundaciones en el ámbito de estudio. Estas son detalladas a continuación:

- **Mejorar la densidad de estaciones meteorológicas e hidrométricas en la zona de estudio;** es necesario rediseñar una red que sea capaz de capturar la especialización y exactitud de las variables meteorológicas en especial la precipitación, esto nos permitirá entender mejor los focos de escorrentía superficial que se formasen en la cuenca.
- **Plantear un sistema de predicción de inundaciones;** para ello sería necesario la predicción de la precipitación principalmente, un sistema de predicción puede ser netamente estadístico basado en la precipitación antecedente o también cabe la posibilidad de construir un sistema acoplado de modelos hidrológicos e hidráulicos, no obstante lo segundo mencionado es más complicado y costoso.
- **Mejorar la información de tipo de suelo y evaluar distintas ecuaciones de infiltración;** como se detalló en la presente investigación la información de tipo de suelo fue uno de los puntos dentro del modelamiento hidrológico que acarreó grandes subjetividades. La única forma de poder generar una correcta espacialización del tipo de suelo es mediante campañas de recojo de información masivas mediante calicatas, no obstante es posible también apoyarse de información auxiliar como el mapa fisiográfico y distancia a cuerpos de agua.

- **Plantear metodologías más robustas del cambio de ocupación de suelo a fin de obtener resultados más precisos;** La metodología planteada en este estudio para la caracterización de la cobertura del suelo es una técnica sencilla basada en reflectancia y algoritmos de clasificación que permite la identificación de macroclases. Para un análisis más fino es necesario complementar con trabajo de campo y con imágenes satelitales de mayor resolución espacial, esto permitiría el contraste y validación de la información generada en la presente investigación.

La implementación y uso de la presente metodología debe ser impulsado por medio de las universidades y de los organismos estatales ligados a la gestión de recursos hídricos y del riesgo de desastres.

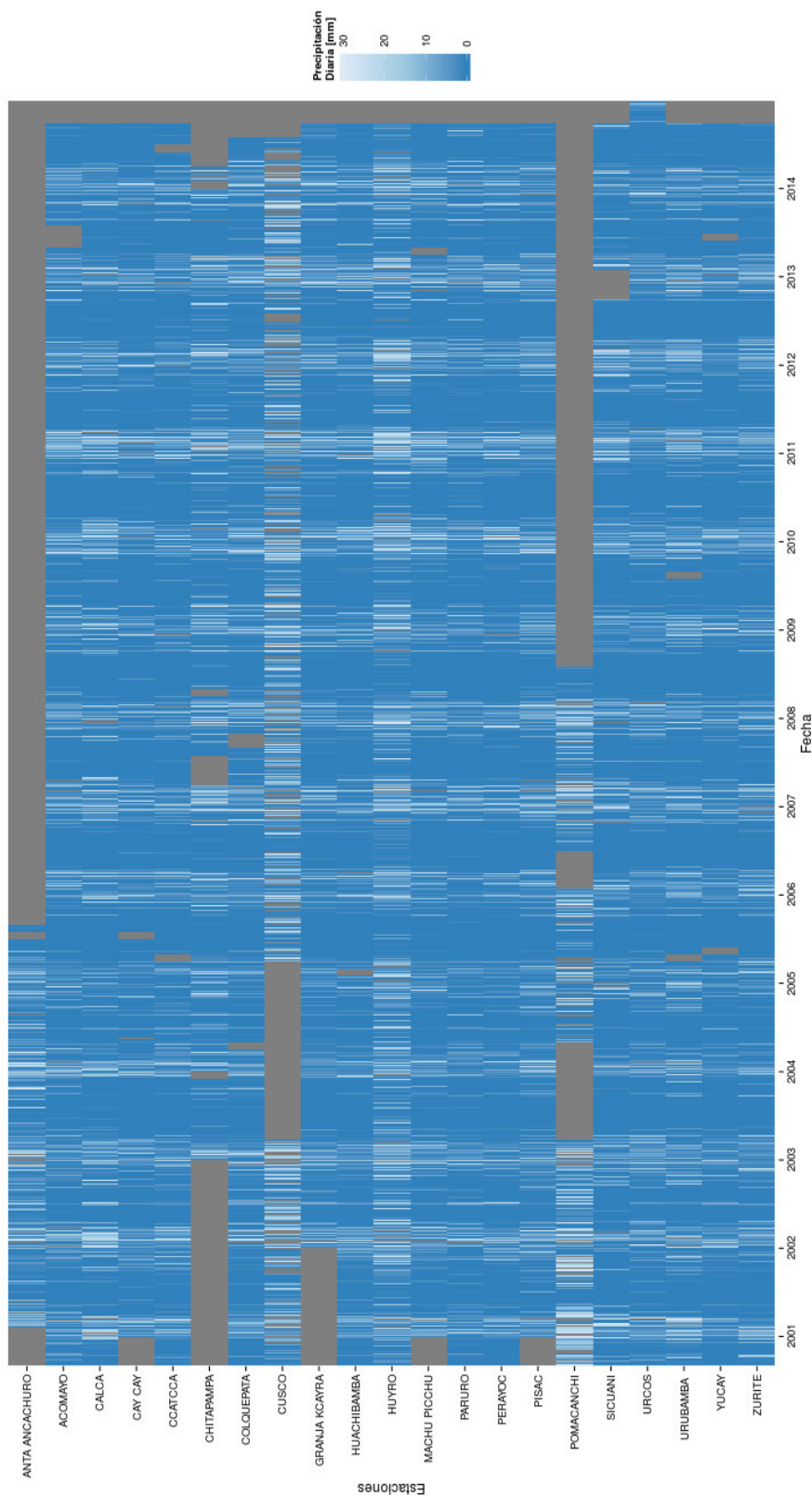
Apéndice

LEYENDA DEL MAPA GEOLOGICO

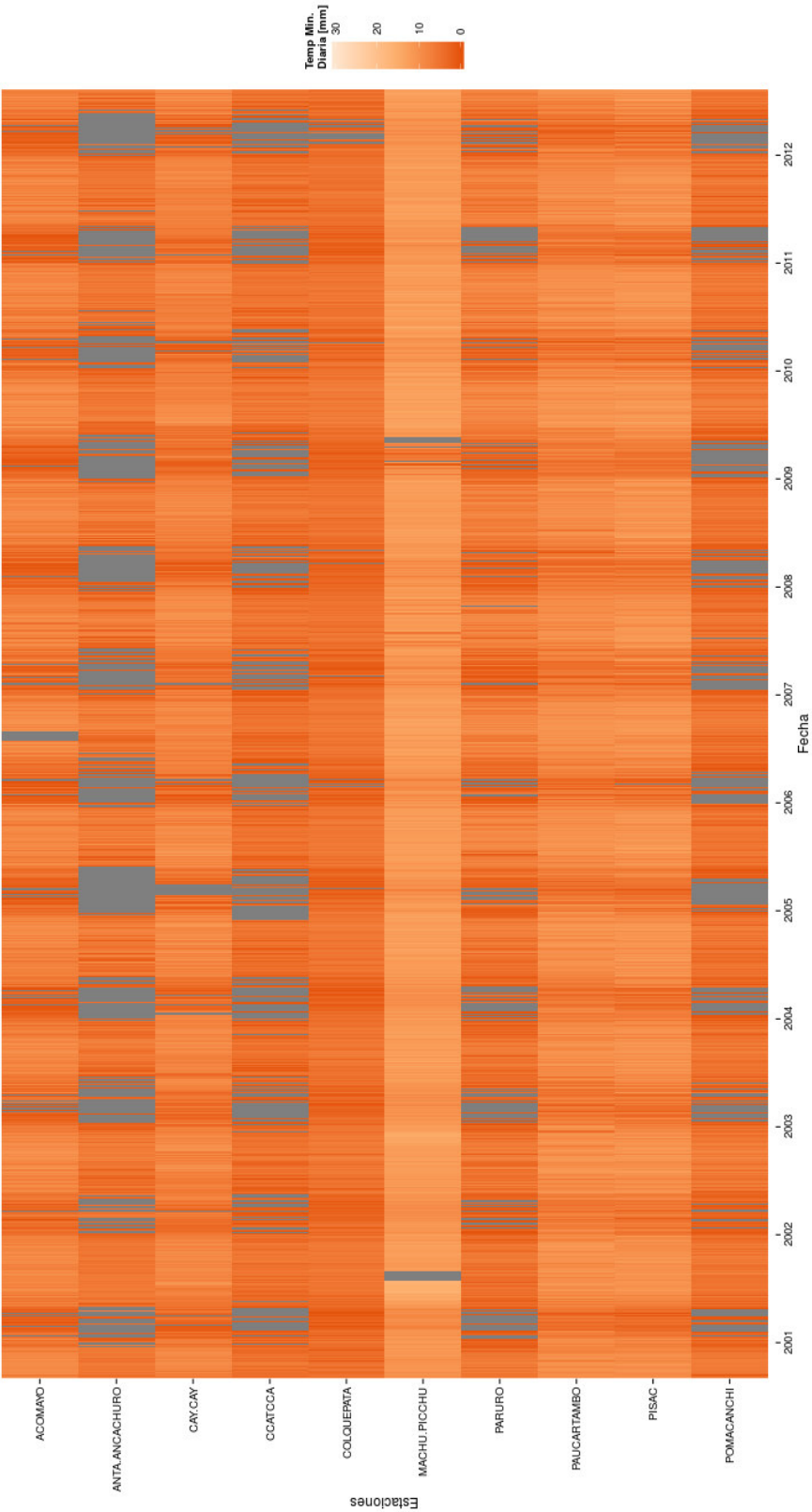
[illegible]

INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO VILCANOTA

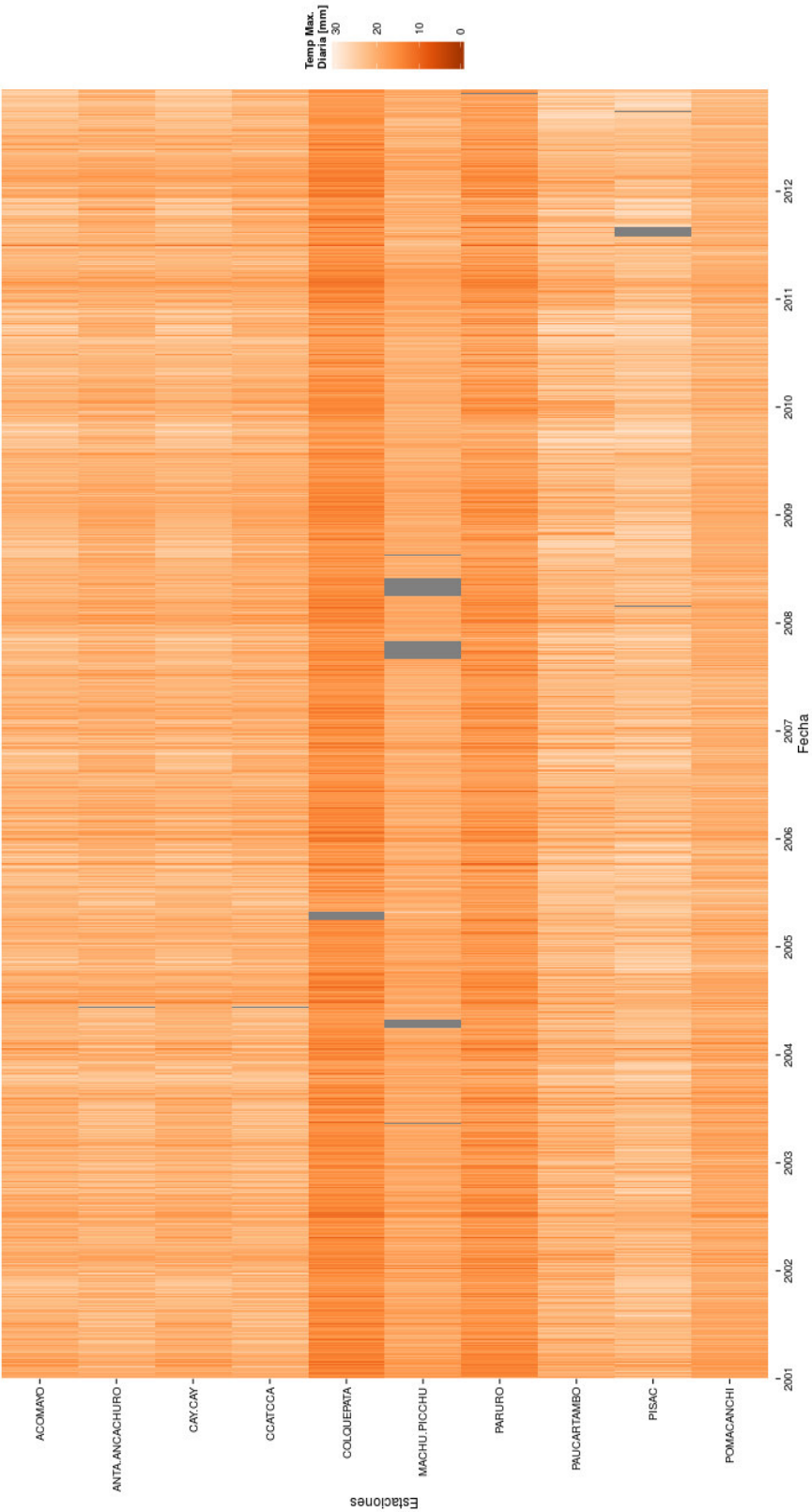
CODIGO	NOMBRE	PROVINCIA	TIPO	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD (msnm)
113038	ACOMAYO	ACOMAYO	CO	-71.684	-13.916944	3227
113035	ANTA ANCACHURO	ANTA	CO	-72.216	-13.468333	3340
113036	CALCA	CALCA	PLU	-71.950	-13.333611	2926
113122	CAY CAY	PAUCARTAMBO	CO	-71.695	-13.597756	3150
113041	CCATCCA	QUISPICANCHI	CO	-71.560	-13.61	3693
113117	CHITAPAMPA	QUISPICANCHI	CO	-71.975	-13.415	4306
113116	COLQUEPATA	PAUCARTAMBO	PLU	-71.673	-13.363333	3699
113063	CUSCO	CUSCO	CO	-71.944	-13.537111	3288
100044	GRANJA KCAYRA	CUSCO	PLU	-71.875	-13.556944	3219
113113	HUACHIBAMBA	CALCA	PLU	-72.100	-13.050278	4225
113030	HUYRO	LA CONVENCION	PLU	-72.450	-13.066944	2326
113031	MACHU PICCHU	URUBAMBA	CO	-72.546	-13.166944	2459
113037	PARURO	PARURO	CO	-71.845	-13.7675	3047
113121	PERAYOC	CUSCO	PLU	-71.950	-13.516944	3429
100101	PISAC	CALCA	CO	-71.850	-13.416111	3147
114046	POMACANCHI	ACOMAYO	CO	-71.573	-14.028056	3686
114033	SICUANI	CANCHIS	PU	-71.237	-14.253611	3574
113039	URCOS	QUISPICANCHI	PU	-71.634	-13.700278	3666
113034	URUBAMBA	URUBAMBA	PU	-72.125	-13.303589	3071
113028	YUCAY	URUBAMBA	PU	-72.084	-13.300278	3481
113033	ZURITE	ANTA	PU	-72.267	-13.466944	3506



Registro de Estaciones de Precipitación

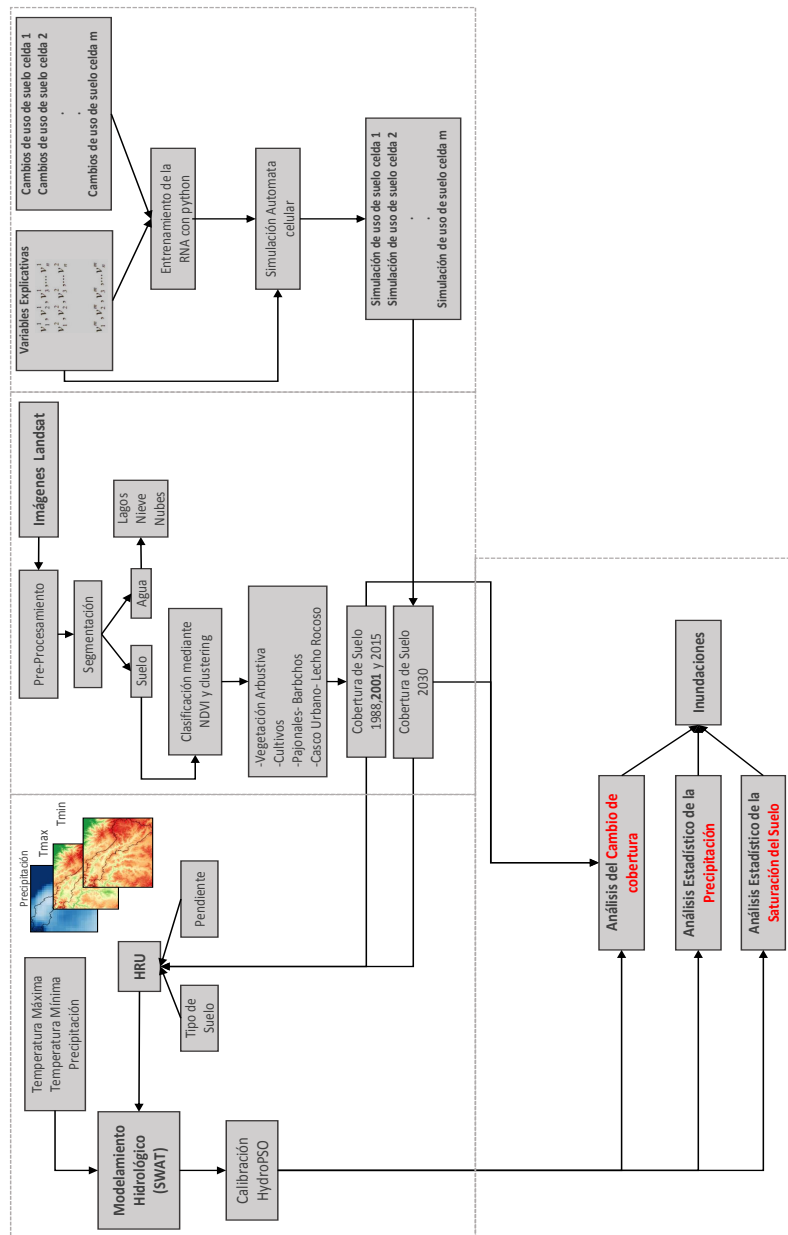


Registro de estaciones de temperatura máxima

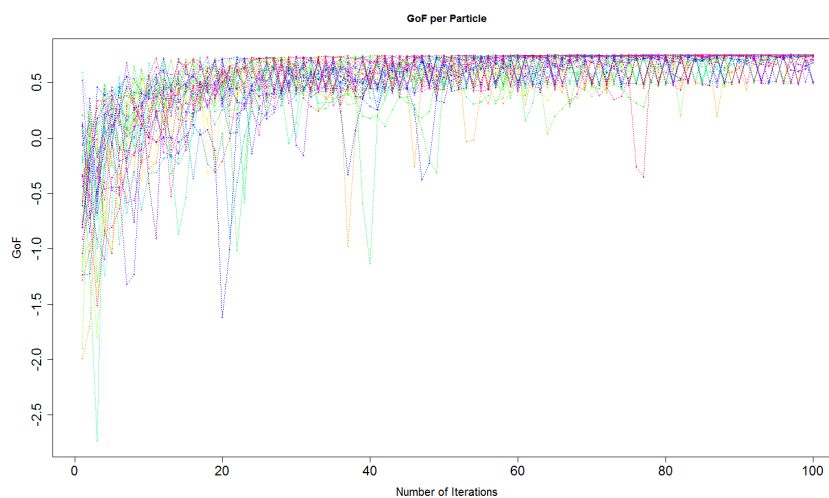


Registro de estaciones de temperatura minima

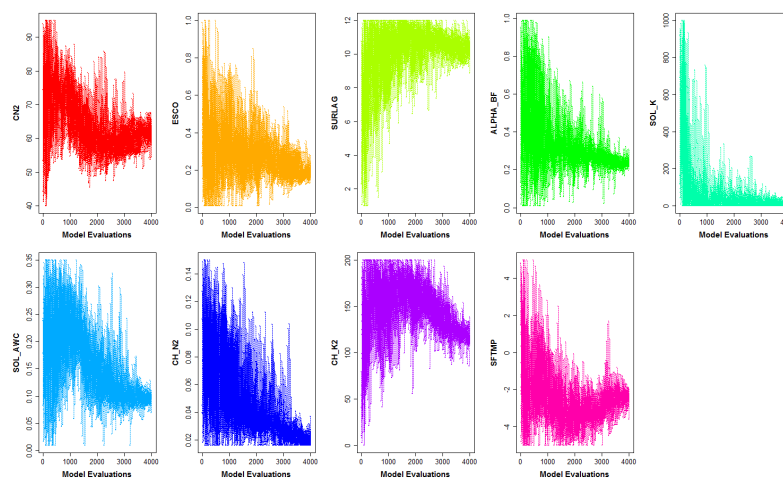
DIAGRAMA CONCEPTUAL DE LA METODOLOGÍA INTEGRADA



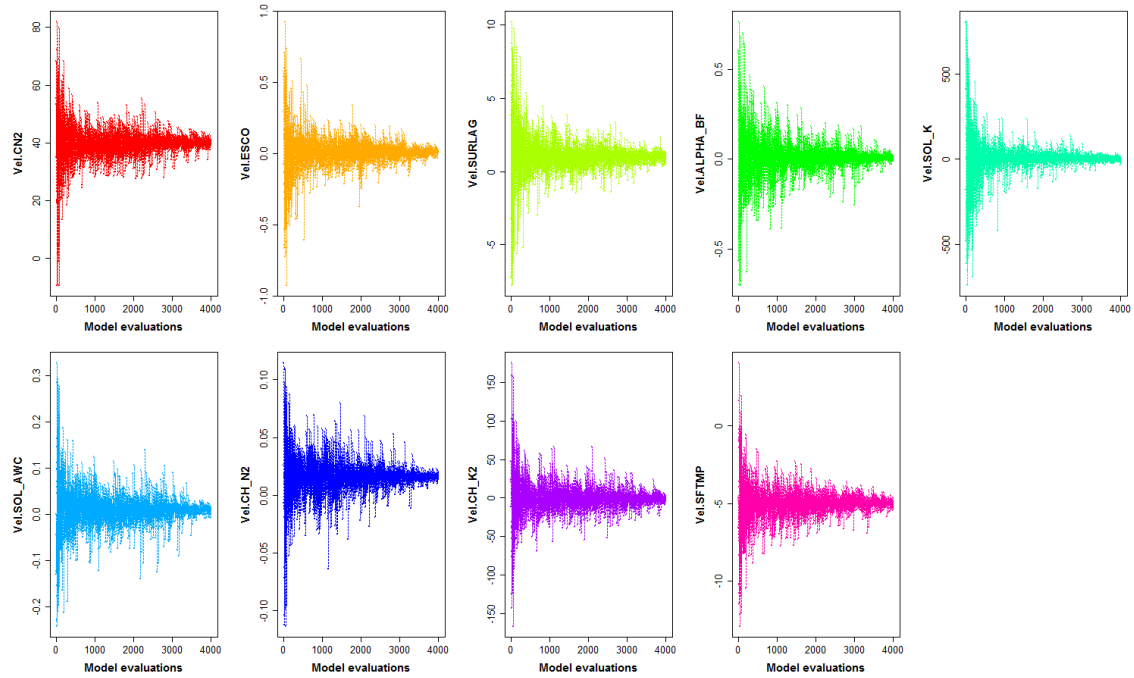
CALIBRACIÓN POR PSO DEL MODELO HIDROLOGICO SWAT



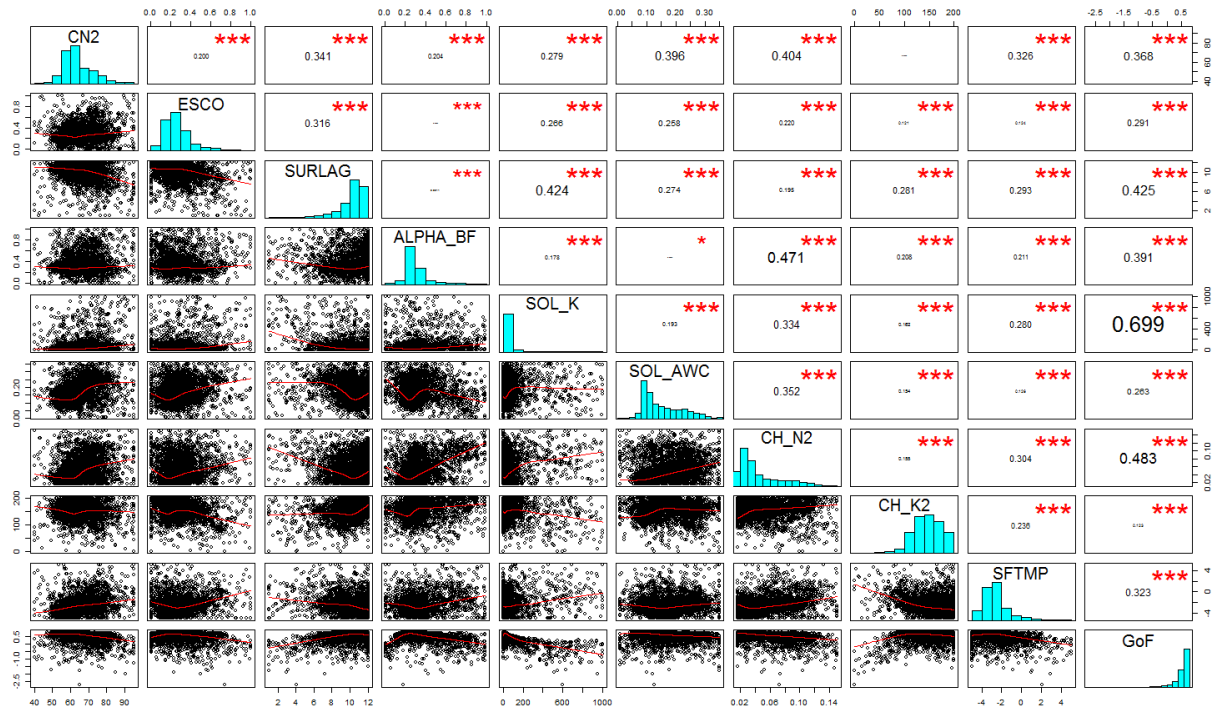
Evolución de la eficiencia de Nash-Sutcliffe para las 40 partículas para 1000 iteraciones.



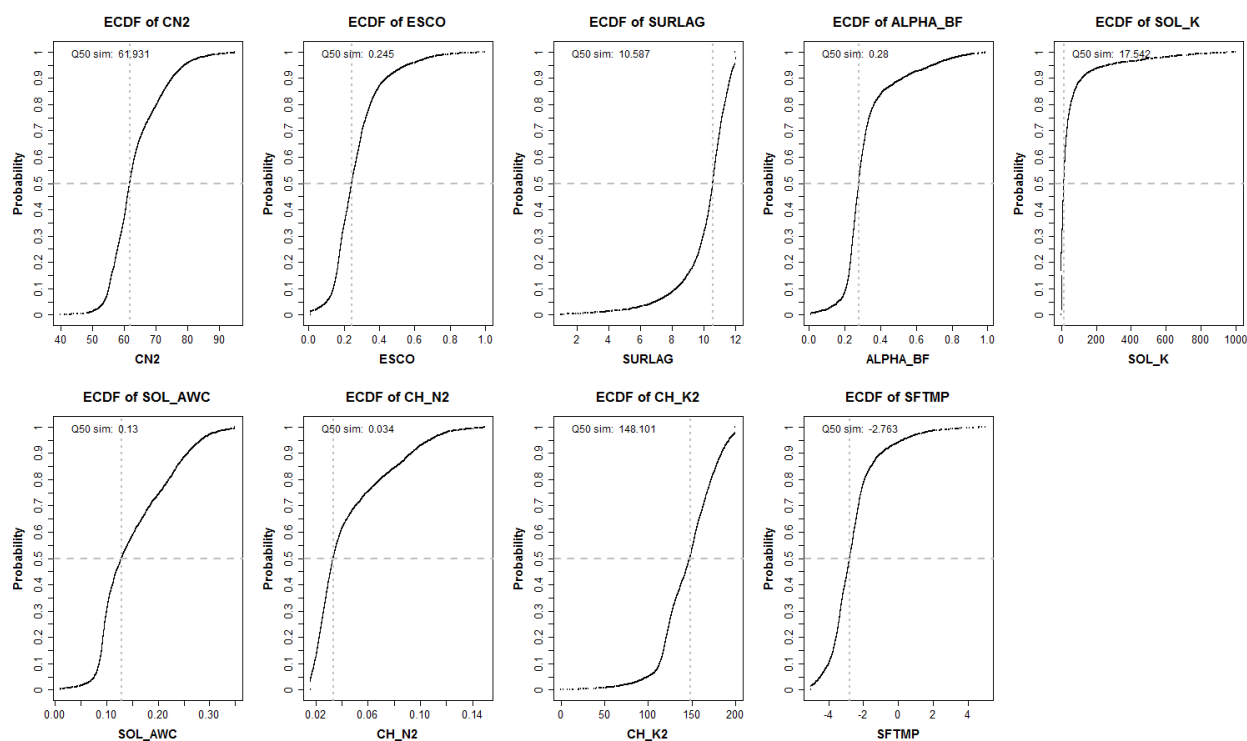
La convergencia de los diferentes parámetros (sensibles) como una función de la evaluación del modelo



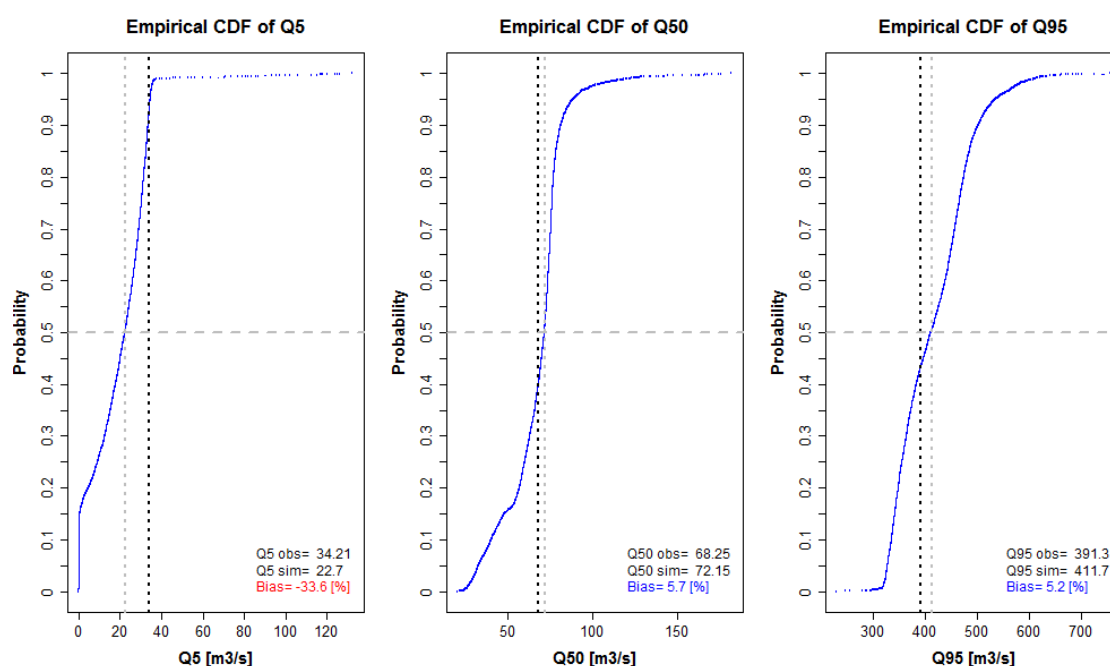
La convergencia de las velocidades para cada parámetro (sensible) como una función de la evaluación del modelo



Matriz que resume la correlación cruzada, histogramas y la significación estadística de la correlación para los parámetros (sensibles) listados en la Tabla 5.2



Funciones de distribución empíricas acumuladas (FDEA) para los parámetros (sensibles) que figuran en la Tabla 5.2. La línea gris discontinua vertical y horizontal indica la ubicación de un percentil.



FDEAs para cuantiles de caudal (5, 95 y 95). La línea vertical discontinua en gris representa el cuantil simulado y en negro los cuantiles observados.

CÓDIGO EN “R” PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

```
#' Calibración del modelo hidrológico SWAT con PSO
#' @description Este script permite la implementación en paralelo de PSO
#'           para el modelo hidrológico SWAT.
#' @details Este código es solo una adaptación del creado por Mauricio
#' Zambrano-Bigiarini & Rodrigo Rojas(2013) para mas información por
#' favor revisar http://cran.r-project.org/web/packages/hydroPSO

### Instalar y cargar las siguientes librerías
### no se encuentra en el CRAN usted debe obtenerlo de
### http://www.rforge.net/SWAT2R/

if (!require(hydroPSO)) stop("Package RCurl is not installed")
if (!require(hydroGOF)) stop("Package raster is not installed")
if (!require(hydroTSM)) stop("Package rgdal is not installed")
if (!require(SWAT2R)) stop("Package gdalUtils is not installed")

### Definición de directorio de trabajo: datos de entrada, de salida y
### archivos de la simulación del modelo

model.drty <- "~/SWAT2005"
setwd(model.drty)
model.drty <- getwd()

### Indicar el periodo de simulación
Sim.Ini="1962-01-01"
Sim.Fin="1965-12-31"
gof.Ini="1962-01-01"
gof.Fin="1965-12-31"

### Indicar la función de bondad de ajuste
gof.FUN <- "NSE"
gof.FUN.args <- list()

### Definir el método de paralelización
```

```
parallel <- "none"          # no paralelización
#parallel <- "multicore"     # UNIX only. solo multi-core
#parallel <- "parallel"      # UNIX only. multi-core y clustering
#parallel <- "parallelWin"   # Windows. multi-core y clustering

# Indicar el numero de cores a utilizar
par.nnodes <- 8
par.pkgs    <- c("hydroGOF", "hydroTSM", "SWAT2R")

### Declaración de los datos observados
obs.fname <- paste(model.drty, "/PSO.in/SWAT_obs.txt", sep="")
q.obs     <- read.zoo(obs.fname)

### Declaración de todos los argumentos requeridos para poder correr
### la la calibración con PSO

model.FUN.args=list(
model.drty=model.drty,
param.files=paste(model.drty, "/PSO.in/ParamFiles.txt", sep=""),
exe.fname="./swat2005.out", # GNU/Linux
#exe.fname="./swat2005.exe", # Windows XP/Vista/7/...
verbose=FALSE,

### Función para la lectura de los datos de caudal simulados
out.FUN="read_rch",
out.FUN.args=list(
file="output.rch",
col.names="FLOW_OUTcms",
out.type="Q",
rchID=1,
Date.Ini=Sim.Ini,
Date.Fin=Sim.Fin,
tstep="daily",
verbose=FALSE
), ###END out.FUN.args
```

```
### Función para evaluar la correlación entre los datos de caudal
### observados y simulados
```

```
gof.FUN=gof.FUN,
gof.FUN.args=gof.FUN.args,
gof.Ini=gof.Ini,
gof.Fin=gof.Fin,
obs=q.obs
)
```

```
#####
###                               Calibración con hydroPSO                               ###
#####
```

```
### Algoritmo principal PSO
### Para poder entender todos los parametros de hydroPSO,
### es muy reocmendable leer Zambrano-Bigiarini and Rojas, 2013
set.seed(100)
system.time(
hydroPSO(
fn="hydromod",
model.FUN="hydromod",
model.FUN.args=model.FUN.args,
control=list(
param.ranges="ParamRanges.txt",
normalise=TRUE,
MinMax="max",
npart=40,
maxit=100,
reltol=1E-30,
Xini.type="lhs",
Vini.type="lhs2011",
lambda=1,
c1=2.05,
c2=2.05,
```

```
use.IW=FALSE,
use.CF=TRUE,
use.TVlambda=TRUE,TVlambda.type="linear",TVlambda.rng=c(1.0,0.5),
TVlambda.exp=1, topology="random", K=11,
boundary.wall="absorbing2011",
write2disk=TRUE,
REPORT=5,
verbose=TRUE,

parallel=parallel,
par.nnodes=par.nnodes,
par.pkgs=par.pkgs
)
)
)

# Vizualizar los resultados
plot_results(do.png=TRUE, MinMax="max", ftype="dm", do.pairs=TRUE,
legend.pos="topleft")
```

Bibliografía

- Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., and Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524:733–752.
- Abdel-Kader, R. F. (2010). Genetically improved PSO algorithm for efficient data clustering. pages 71–75. IEEE.
- Afsahi, Z. and Meybodi, M. (2010). Improving cooperative PSO using fuzzy logic. pages 219–232. Springer.
- Aparicio Mijares, F. J. and Mijares, F. A. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*.
- Basheer, I. and Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of microbiological methods*, 43(1):3–31.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(1):2–16.
- Boluwade, A. and Rasmussen, P. (2015). Frequency of floods in a changing climate: a case study from the Red River in Manitoba, Canada. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 371:83.
- Brown, D., Goovaerts, P., Burnicki, A., and Li, M. (2002). Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(10):1051–1061.
- Brown, D. G., Pijanowski, B. C., and Duh, J. (2000). Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management*, 59(4):247–263.

- Carpenter, Theresa M & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329(1):174–185.
- Chen, H., Tong, S. T., Yang, H., and Yang, Y. J. (2014). Simulating the hydrologic impacts of land-cover and climate changes in a semi-arid watershed. *Hydrological Sciences Journal*, (just-accepted).
- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., Lu, M., et al. (2015). Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103:7–27.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., et al. (1988). *Applied hydrology*.
- Clarke, R. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of hydrology*, 19(1):1–20.
- Criss, R. E. and Winston, W. E. (2008). Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, 22(14):2723.
- Del Carmen, R. (2001). Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J., and Neitsch, S. (2002). ArcView interface for SWAT2000. *BRC Report*, pages 02–07.
- Eberhart, R. C. and Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. volume 1, pages 39–43. New York, NY.
- Eberhart, R. C. and Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. volume 1, pages 81–86. IEEE.
- El Dor, A., Clerc, M., and Siarry, P. (2012). A multi-swarm PSO using charged particles in a partitioned search space for continuous optimization. *Computational Optimization and Applications*, (1):271–295.
- El-Sawy, A. A., Hendawy, Z. M., and El-Shorbagy, M. A. (2013). Reference Point Based TR-PSO for Multi-Objective Environmental/Economic Dispatch. *Applied Mathematics*, 4(05):803.
- Fedora, M. and Beschta, R. (1989). Storm runoff simulation using an antecedent precipitation index (API) model. *Journal of hydrology*, 112(1):121–133.

- Franco, J. (2011). Un algoritmo basado en la optimización por enjambre de partículas para el problema de asignación axial 3D.
- Freeman, J. A. and Skapura, D. M. (1993). Redes neuronales.
- Froidevaux, P., Schwanbeck, J., Weingartner, R., Chevalier, C., and Martius, O. (2015). Flood triggering in Switzerland: the role of daily to monthly preceding precipitation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9):3903–3924.
- Gómez, H. (2004). Contaminación del agua y deterioro ambiental: caso de los ríos Vilcanota-Huatanay. pages 1–20.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1):80–91.
- Gupta, V. K. and Sorooshian, S. (1985). The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 81(1):57–77.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *American Society of Agricultural Engineers*.
- Hengl, Tomislav, J. M. M. R. A. B. N. H. H. G. B. R. E. S.-R. A. K. B. L. J. G. W. and G, M. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PloS one*, 9(8):e105992.
- Holvoet, K., van Griensven, A., Seuntjens, P., and Vanrolleghem, P. (2005). Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(8):518–526.
- Huggel, C., Raissig, A., Rohrer, M., Romero, G., Diaz, A., and Salzmann, N. (2014). How useful and reliable are disaster databases in the context of climate and global change? A comparative case study analysis in Perú. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 2:4331–4362.
- Inca, G. C. (2009). Assessing the land cover and land use change and its impact on watershed services in a tropical Andean watershed of Perú.
- Iseri, H., H. K. H. M. y. M. M. (2013). Simulation of rainfall runoff and pollutant load for Chikugo River basin in Japan using a GIS-based distributed parameter model. *Paddy and Water Environment*, 11(1-4):97–112.

- Isong, M., Eyo, E., Eyoh, A., Nwanekezie, O., Olayinka, D. N., Udoudo, D. O., and Ofem, B. (2012). GIS cellular automata using artificial neural network for land use change simulation of Lagos, Nigeria. *Journal of Geography and Geology*, 4(2):p94.
- Jain, A. K., Mao, J., and Mohiuddin, K. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, (3):31–44.
- Kiamehr, R. and Sjöberg, L. (2005). Effect of the SRTM global DEM on the determination of a high-resolution geoid model: a case study in Iran. *Journal of Geodesy*, 79(9):540–551.
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D., and Knoke, T. (2013). Land use/land cover change analysis using object-based classification approach in Munessa-Shashemene landscape of the Ethiopian Highlands. *Remote Sensing*, 5(5):2411–2435.
- Lambin, E. F., Geist, H. J., and Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28(1):205–241.
- Lavado, W., Silvestre, E., and Pulache, W. (2010). Tendencias en los extremos de lluvias cerca a la ciudad del Cusco y su relación con las inundaciones de enero del 2010.
- Li, M., Wu, Y., and Zhang, Q. (2009). SAR image segmentation based on mixture context and wavelet hidden-class-label Markov random field. *Computers & Mathematics with Applications*, 57(6):961–969.
- Linsley, R. and Kohler, M. (1951). Predicting runoff from storm rainfall. *US Weather Research Paper*, 34.
- Liu, X., L. F. M. W. X. L. X. D. Y. Y. C. S. X. y. A. T. (2015). Combining rainfall data from rain gauges and TRMM in hydrological modelling of Laotian data-sparse basins. *Applied Water Science*, pages 1–10.
- Ludwig, R. and Schneider, P. (2006). Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5):339–358.
- Mahajan, Y. and Venkatachalam, P. (2009). Neural network based cellular automata model for dynamic spatial modeling in GIS. pages 341–352. Springer.

- Mengistu, D. T., Moges, S. A., and Sorteberg, A. (2016). Revisiting Systems Type Black-Box Rainfall-Runoff Models for Flow Forecasting Application. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(01):65.
- Miller, S. N., Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Hernandez, M., Miller, R. C., Kepner, W. G., and Guertin, D. P. (2007). The automated geospatial watershed assessment tool. *Environmental Modelling & Software*, 22(3):365–377.
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. volume 19, page 4.
- Moore, I. D. (1996). Hydrologic modeling and GIS. *GIS and environmental modeling: Progress and research issues*, pages 143–148.
- Muleta, M. K. and Nicklow, J. W. (2005). Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, 306(1):127–145.
- Musau, J., Sang, J., Gathenya, J., Luedeling, E., and Home, P. (2015). SWAT model parameter calibration and uncertainty analysis using the HydroPSO R package in Nzoia Basin, Kenya. *Journal of Sustainable Research in Engineering*, 1(3):17–29.
- Nash, J. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3):282–290.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., and King, K. (2005a). Soil and water assessment tool theoretical documentation. Grassland. *Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX*.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., and King, K. (2005b). SWAT theoretical documentation version 2005. *Blackland Research Center, Temple, TX*.
- Nikolakopoulos, K. G., Kamaratakis, E. K., and Chrysoulakis, N. (2006). SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of remote sensing*, 27(21):4819–4838.
- Olaya, V. (2004). Hidrología computacional y modelos digitales del terreno-teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico. *Obtenido desde: <http://heart.sourceforge.net/sp/index.htm>*. [Consulta: octubre, 21/2015].
- Olaya, V. (2012). Sistemas de información geográfica. *Tomos I y II. Disponible libre formato Pdf en*.

- Oñate Valdivieso, F. (2009). Modelamiento semidistribuido, con información escasa, de una cuenca hidrográfica para su planificación territorial.
- Parraguez, L., Heraoui, M., and Rengel, J. E. (2015). Entonación de controladores mediante optimización por enjambre de partículas.
- Peraza-Castro, M., Ruiz-Romera, E., Montoya-Armenta, L., Sánchez-Pérez, J., and Sauvage, S. (2015). Evaluation of hydrology, suspended sediment and Nickel loads in a small watershed in Basque Country (Northern Spain) using eco-hydrological SWAT model. volume 51, pages 59–70. EDP Sciences.
- Pijanowski, B. C., Brown, D. G., Shellito, B. A., and Manik, G. A. (2002). Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model. *Computers, environment and urban systems*, 26(6):553–575.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall.
- Pontius, G. R. and Malanson, J. (2005). Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2):243–265.
- Priestley, C. and Taylor, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2):81–92.
- Proano, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., and Cisneros, C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato.
- Qiang, Y. and Lam, N. S. (2015). Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata. *Environmental monitoring and assessment*, 187(3):1–16.
- Quintero, M., Wunder, S., and Estrada, R. D. (2009). For services rendered? Modeling hydrology and livelihoods in Andean payments for environmental services schemes. *Forest Ecology and Management*, 258(9):1871–1880.
- Raissig, A., Huggel, C., Romero, G., and Díaz, A. (2010). Análisis espacio-temporal de desastres en las regiones de Cusco y Apurímac 1970-2010.
- Ramos Fernandez, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida*. PhD thesis, Editorial Universitat Politècnica de València.

- Refsgaard, J. C. and Knudsen, J. (1996). Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7):2189–2202.
- Reuter, H. I., Nelson, A., and Jarvis, A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9):983–1008.
- Reyes, O. A. C. (2014). Utilización de modelos hidrológicos para la determinación de cuencas en ecosistemas de páramo. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 4(2).
- Roberts Matthew, O. C. and Emma, B. (2012). Estimation of flood risk and floodwater levels in the Vilcanota Basin, South America.
- Rojas, R. and Zambrano-Bigiarini, M. (2012). Tutorial for interfacing hydroPSO with SWAT-2005 and MODFLOW-2005.
- Rouse Jr, J., Haas, R., Schell, J., and Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351:309.
- Satgé, F., Bonnet, M.-P., Timouk, F., Calmant, S., Pillco, R., Molina, J., Lavado-Casimiro, W., Arsen, A., Crétaux, J., and Garnier, J. (2015). Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2):465–488.
- Schneider, L. C. and Pontius, R. G. (2001). Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85(1):83–94.
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M., Black, A., Hoffmann, L., and Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LIDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 63(3):283–296.
- Servat, G. P., Mendoza, W., and Ochoa, J. A. (2015). Flora y fauna de cuatro bosques de Polylepis (Rosaceae) en la cordillera del Vilcanota (Cusco, Peru). *Ecología Aplicada*, 1(1):25–35.
- Sohl, T. L. (1999). Change analysis in the United Arab Emirates: an investigation of techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(4):475–484.

- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., and Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533:152–167.
- Theobald, D. M. and Hobbs, N. T. (1998). Forecasting rural land-use change: a comparison of regression-and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modelling*, 2:65–82.
- Tobón, C. and Morales, E. G. G. (2009). Capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los páramos andinos. *Avances Recursos Hidráulicos*, (15).
- Tosi, J. A. (1960). *Zonas de vida natural en el Perú: memoria explicativa sobre el mapa ecológico del Perú*, volume 5. IICA Biblioteca Venezuela.
- Tucci, C. E. (1998). *Modelos hidrológicos*. UFRGS.
- Tupayachi, A. (2005). Flora de la cordillera del Vilcanota. *Arnaldoa*, 12(1-2):126–144.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of hydrology*, 324(1):10–23.
- Van Liew, M. W., Veith, T. L., Bosch, D. D., and Arnold, J. G. (2007). Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2):173–189.
- Van Vliet, J., Hurkens, J., White, R., and van Delden, H. (2012). An activity-based cellular automaton model to simulate land-use dynamics. *Environment and Planning-Part B*, 39(2):198.
- Viessman Jr, W. and Lewis, G. L. (1996). Introduction to Hydrology, Harper Collins College Publishers. *New York*.
- Villón, M. (2004). Hidrología. *Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica*.
- Wang, Z., Zhang, B., Zhang, S., Li, X., Liu, D., Song, K., Li, J., Li, F., and Duan, H. (2006). Changes of land use and of ecosystem service values in Sanjiang Plain, Northeast China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112(1-3):69–91.

- Wang, K., Z. Q. C. Y. D. S. y. V. P. (2015). Effects of land-use/cover change on hydrological processes using a GIS/RS-based integrated hydrological model: case study of the East River, China. *Hydrological Sciences Journal*, 60(10):1724–1738.
- Ward, D. P., Murray, A. T., and Phinn, S. R. (2000). A stochastically constrained cellular model of urban growth. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(6):539–558.
- Weng, Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of environmental management*, 64(3):273–284.
- Wu, S.-J., Hsu, C.-T., Lien, H.-C., and Chang, C.-H. (2015). Modeling the effect of uncertainties in rainfall characteristics on flash flood warning based on rainfall thresholds. *Natural Hazards*, 75(2):1677–1711.
- Yacoub, C. and Pérez-Foguet, A. (2009). Assessment of terrain slope influence in SWAT modeling of Andean watersheds. volume 11, page 6381.
- Yen, H., White, M. J., Jeong, J., Arabi, M., and Arnold, J. G. (2015). Evaluation of alternative surface runoff accounting procedures using SWAT model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3):64–68.
- Zambrano-Bigiarini, M. and Rojas, R. (2012). hydroPSO: A Versatile Particle Swarm Optimisation R Package for Calibration of Environmental Models. volume 14, page 10950.
- Zambrano-Bigiarini, M. and Rojas, R. (2013). A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling & Software*, 43:5–25.